

AALTO-YLIOPISTO

SÄHKÖTEKNIIKAN KORKEAKOULU

Elektroniikan Laitos
Valaistusyksikkö

Katerina Zaitseva

Aurinkosähköjärjestelmien, elektronisesti kommutoitujen tasavirtamoottoreiden ja LED-valaistuksen käytön vaikutus rakennusten sähkön laatuun

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 16.4.2012

Työn valvoja Professori Liisa Halonen

Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Sirpa Eskelinen

Tekijä: Katerina Zaitseva

Työn nimi: Aurinkosähköjärjestelmien,
elektronisesti kommutoitujen
tasavirtamoottoreiden ja LED-
valaistuksen käytön vaikutus rakennusten
sähkön laatuun

Päivämäärä: 16.4.2012

Sivumäärä: 75

Elektroniikan laitos, Valaistusyksikkö

Professori: Valaistustekniikka ja sähköinen talotekniikka

Koodi: S-118

Valvoja: Professori Liisa Halonen

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Sirpa Eskelinen

Helsingin kaupungin omistamissa kiinteistöissä on kokeiltu aurinkosähköjärjestelmien, elektronisesti kommutoitujen tasavirtamoottoreiden eli EC-moottoreiden ja LED-valaistuksen käyttöä. Nämä uudet energiatehokkaat teknologiat sisältävät kuitenkin epälineaarisia komponentteja, jotka synnyttävät harmonisia yliaaltojännitteitä sähköverkkoon.

Diplomityön päätavoitteena oli tutkia Helsingin kaupungin kouluissa sijaitsevien aurinkosähköjärjestelmän, EC-moottorin ja LED-valaistuksen tuottamia harmonisia yliaaltojännitteitä. Työn osatavoitteena oli tutkia edellä mainittujen tutkimuskohteiden tuottamia harmonisia yliaaltovirtoja.

Tutkimuskohteiden harmonisia yliaaltoja tutkittiin suorittamalla standardin SFS-EN 50160 mukaiset sähkön laadun mittaukset Fluke 435 kolmivaiheisen sähkön laadun analysaattorin avulla. Kaikista tutkimuskohteista mitattuja harmonisia yliaaltojännitteitä verrattiin standardissa SFS-EN 50160 sallittuihin arvoihin ja LED-valaistuksen mitattuja harmonisia yliaaltovirtoja verrattiin standardissa IEC 61000-3-2 sallittuihin arvoihin.

Diplomityön tutkimustulosten perusteella on havaittu, että mikään työn tutkimuskohteista ei aiheuta standardissa SFS-EN 50160 sallittuja arvoja ylittäviä jännitteen harmonisia yliaaltoja. Myöskään työssä tarkasteltava LED-valaistus ei aiheuta standardissa IEC 61000-3-2 sallittuja arvoja ylittäviä virran harmonisia yliaaltoja. Sekä harmonisten yliaaltojännitteiden että -virtojen tutkimustuloksista oli selvästi havaittavissa se, että parittomat yliaallot olivat dominoivia verrattuna parillisiin yliaaltoihin. Näiden tutkimustulosten valossa näyttää siltä, että Helsingin kaupunki voisi jatkaa aurinkosähköjärjestelmien, EC-moottoreiden ja LED-valaistuksen hankintaa kiinteistöihinsä.

Avainsanat: harmoniset yliaallot, harmoniset yliaaltojännitteet, harmoniset yliaaltovirrat, aurinkosähköjärjestelmä, EC-moottori, LED, sähkön laatu

Author: Katerina Zaitseva

Name of the thesis: The influence of the use of photovoltaic systems, electronically commutated motors and LED lighting on the power quality of buildings

Date: 16.4.2012

Number of pages: 75

Department of Electronics, Lighting unit

Professorship: Illumination engineering and electrical building services Code: S-118

Supervisor: Professor Liisa Halonen

Instructor: M. Sc. Sirpa Eskelinen

The City of Helsinki has experimented with the use of photovoltaic systems, electronically commutated or EC motors and LED lighting in the city owned properties. However, these new technologies include non-linear components that generate harmonic voltages to the grid.

The main goal of this master's thesis was to investigate the harmonic voltages produced by the photovoltaic system, EC motor and LED lighting that are located in the schools of the City of Helsinki. The secondary goal of this master's thesis was to investigate the harmonic currents produced by the LED lighting in the above-mentioned research subjects.

The harmonics produced by the research subjects were studied by performing the power quality measurements in accordance with the standard SFS-EN 50160 and with a Fluke 435 Three Phase Power Quality Analyzer. All measured harmonic voltages produced by research subjects were compared with the values permissible in the standard SFS-EN 50160 and measured harmonic currents produced by the LED lighting were compared with the values permissible in the standard IEC 61000-3-2.

The research results of this master's thesis show that none of the research subjects produces harmonic voltages that exceed values permissible in the standard SFS-EN 50160. Similarly, the LED lighting examined in this study does not produce harmonic currents that exceed values permissible in the standard IEC 61000-3-2. The research results of both harmonic voltages and currents clearly demonstrate that odd harmonics are dominating compared to the even ones. Based on these research results, it appears that the City of Helsinki could continue to purchase photovoltaic systems, EC motors and LED lighting to its properties.

Keywords: harmonics, harmonic voltages, harmonic currents, photovoltaic system, EC motor, LED, power quality

Alkulause

Tämä diplomityö on tehty Helsingin kaupungin rakennusviraston HKR-Rakennuttajan talotekniselle toimistolle. Ensinnäkin haluan kiittää HKR-Rakennuttajan taloteknisen toimiston toimistopäällikköä Jukka Forsmania mielenkiintoisen, mutta samalla myös haastavan työn mahdollistamisesta ja taloudellisesta tuesta.

Suuret kiitokset kuuluvat diplomityön ohjaajalleni, HKR-Rakennuttajan taloteknisen toimiston johtavalle energia-asiantuntijalle Sirpa Eskeliselle hyvästä ohjauksesta, kannustuksesta ja työni kielentarkastuksesta. Haluan kiittää myös työn valvojaani professori Liisa Halosta hänen arvokkaista ja asiantuntevista neuvoista sekä työn aikatauluttamisesta, mikä on antanut minulle motivaatiota työn kirjoittamiseen sekä edistänyt nopeaa valmistumistani. Kiitän myös valaistusyksikön tekniikan lisensiaattia Mikko Hyväristä työni kommentoinnista ja kielentarkastuksesta. Lisäksi esitän erityiskiitokset Saskon Oy:n sähkötöiden johtajalle Arto Ala-Kortesniemelle korvaamattomasta avusta sähkön laadun mittausten suorittamisessa.

Lopuksi haluan lämpimästi kiittää rakasta aviomiestäni Alexandrea, joka on kannustanut ja tukenut minua niin diplomityöprosessin kuin koko opiskelunikin aikana.

Espoossa huhtikuun 16. päivänä 2012

Katerina Zaitseva

Sisällysluettelo

| | |
|--|----|
| Alkulause..... | 4 |
| Sisällysluettelo..... | 5 |
| Symboli-, lyhenne- ja käsiteluettelo..... | 7 |
| 1 Johdanto..... | 10 |
| 1.1 Tutkimuksen tausta | 10 |
| 1.2 Tutkimusongelma..... | 10 |
| 1.3 Tutkimuksen tavoite | 12 |
| 1.4 Tutkimuksen rakenne | 12 |
| 2 Sähkön laatu | 14 |
| 2.1 Määritelmä | 14 |
| 2.2 Ideaalinen vaihtojännitteen sähkön laatu | 14 |
| 2.3 Sähkön laadun ongelmat | 15 |
| 2.4 Sähkön laadun osatekijät | 16 |
| 2.4.1 Käyttökeskeytykset | 16 |
| 2.4.2 Jännitekuopat | 17 |
| 2.4.3 Jännitteen nousut..... | 17 |
| 2.4.4 Transienttiylijännitteet | 18 |
| 2.4.5 Jännitetason vaihtelu..... | 19 |
| 2.4.6 Taajuuspoikkeamat | 20 |
| 2.4.7 Jännite-epäsymmetria | 21 |
| 2.4.8 Harmoniset yliaaltojännitteet | 21 |
| 2.4.9 Epäharmoniset yliaaltojännitteet..... | 22 |
| 2.4.10 Verkon signaalijännitteet | 22 |
| 3 Harmoniset yliaallot | 23 |
| 3.1 Määritelmä | 23 |
| 3.2 Fourier-sarja | 24 |
| 3.3 Tunnusluvut..... | 28 |
| 3.3.1 Harmoninen yksittäissäro | 28 |
| 3.3.2 Harmoninen kokonaissäro | 29 |
| 3.4 Spektri | 29 |
| 3.5 Yliaaltojen lähteet | 30 |
| 3.5.1 Yleistä | 30 |
| 3.5.2 Lähteet | 30 |
| 3.6 Yliaaltojen haitat | 31 |
| 3.6.1 Muuntajat | 31 |
| 3.6.2 Moottorit | 32 |
| 3.6.3 Kondensaattoriparistot | 32 |
| 3.6.4 Kaapelit ja johtimet..... | 32 |
| 3.6.5 Mittaus- ja suojalaitteet..... | 32 |
| 3.7 Yliaaltojen suodatus | 33 |
| 3.7.1 Passiiviset suodattimet..... | 33 |
| 3.7.2 Aktiiviset suodattimet..... | 34 |
| 4 Uudet energiatehokkaat teknologiat | 35 |
| 4.1 Aurinkosähköjärjestelmä..... | 35 |
| 4.1.1 Toimintaperiaate | 35 |
| 4.1.2 Komponentit | 35 |
| 4.1.3 Järjestelmien tyypit | 36 |
| 4.1.4 Edut | 37 |
| 4.2 EC-moottori..... | 37 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.2.1 | Toimintaperiaate | 38 |
| 4.2.2 | Kytkeä sähköverkkoon | 38 |
| 4.2.3 | Edut | 39 |
| 4.3 | LED | 39 |
| 4.3.1 | Toimintaperiaate | 39 |
| 4.3.2 | Kytkeä sähköverkkoon | 40 |
| 4.3.3 | Edut | 40 |
| 5 | Standardit | 42 |
| 5.1 | SFS-EN 50160 | 42 |
| 5.1.1 | Standardin esittely | 42 |
| 5.1.2 | Sallitut harmoniset yliaaltojännitteet | 42 |
| 5.2 | IEC 61000-3-2 | 43 |
| 5.2.1 | Standardin esittely | 43 |
| 5.2.2 | Sallitut harmoniset yliaaltovirrat | 43 |
| 6 | Mittaukset | 45 |
| 6.1 | Tutkimuskohteet | 45 |
| 6.1.1 | Aurinkosähköjärjestelmä | 45 |
| 6.1.2 | EC-moottori | 45 |
| 6.1.3 | LED-valaistus | 46 |
| 6.2 | Mittauksissa käytetyt laitteet | 46 |
| 6.3 | Mittausmenetelmä | 47 |
| 7 | Tutkimustulokset | 49 |
| 7.1 | Aurinkosähköjärjestelmä | 49 |
| 7.1.1 | Jännitteen harmoniset yliaallot | 49 |
| 7.1.2 | Virran harmoniset yliaallot | 51 |
| 7.1.3 | Tehon harmoniset yliaallot | 52 |
| 7.2 | EC-moottori | 53 |
| 7.2.1 | Jännitteen harmoniset yliaallot | 53 |
| 7.2.2 | Virran harmoniset yliaallot | 55 |
| 7.2.3 | Tehon harmoniset yliaallot | 57 |
| 7.3 | LED-valaistus | 58 |
| 7.3.1 | Jännitteen harmoniset yliaallot | 58 |
| 7.3.2 | Virran harmoniset yliaallot | 60 |
| 7.3.3 | Tehon harmoniset yliaallot | 61 |
| 8 | Johtopäätökset | 63 |
| 8.1 | Keskeiset tutkimustulokset | 63 |
| 8.2 | Tutkimustulosten luotettavuusanalyysi | 64 |
| 8.3 | Jatkotutkimukset | 65 |
| | Kirjallisuus | 66 |
| | Liitteet | 70 |
| | Liite 1. Fluke 435 kolmivaiheinen sähkön laadun analysaattori | 70 |
| | Liite 2. Fluke 435 kolmivaiheisen sähkön laadun analysaattorin tekniset tiedot harmonisten yliaaltojen mittausalueiden, erottelukyvyn ja tarkkuuden osalta | 71 |
| | Liite 3. Fluke i400s AC-virtapihdit | 72 |
| | Liite 4. Fluke i400s AC-virtapihtien tekniset tiedot | 73 |
| | Liite 5. Fluke 435 kolmivaiheisen sähkön laadun analysaattorin liittäminen kolmivaihejärjestelmään | 74 |
| | Liite 6. Mittaustilanne | 75 |

Symboli-, lyhenne- ja käsiteluettelo

Symbolit

| | |
|-------------|---|
| a_0 | Fourier-sarjan kerroin tasakomponentille |
| a_h | Fourier-sarjan kerroin kosinimuotoiselle komponentille |
| b_h | Fourier-sarjan kerroin sinimuotoiselle komponentille |
| c_0 | Fourier-sarjan tasakomponentti |
| c_1 | Fourier-sarjan perustaajuisen komponentin amplitudi |
| $c_{1,rms}$ | Fourier-sarjan perustaajuisen komponentin amplitudin tehollisarvo |
| c_h | Fourier-sarjan harmonisen yliaaltokomponentin amplitudi |
| $c_{h,rms}$ | Fourier-sarjan harmonisen yliaaltokomponentin amplitudin tehollisarvo |
| f | taajuus |
| f_1 | perusaallon taajuus |
| f_h | harmonisen yliaallon taajuus |
| $F(t)$ | jaksollinen epäsinimuotoinen funktio |
| h | yliaallon järjestysluku |
| I_1 | virran perustaajuisen komponentin amplitudi |
| I_h | virran h:n harmonisen yliaaltokomponentin amplitudi |
| t | aika |
| T | jaksonaika |
| U | jännitteen amplitudi |
| U_1 | jännitteen perustaajuisen komponentin amplitudi |
| U_h | jännitteen h:n harmonisen yliaaltokomponentin amplitudi |
| φ_h | Fourier-sarjan harmonisen yliaaltokomponentin vaihekulma |
| ω | kulmanopeus |
| ω_0 | Fourier-sarjan perustaajuisen komponentin kulmanopeus |

Lyhenteet

| | |
|-----------------|--|
| CO ₂ | hiilidioksidi |
| EC-moottori | Electronically Commutated motor – elektronisesti kommutoitu moottori |
| EMC-direktiivi | Electromagnetic Compatibility Directive – sähkömagneettisen yhteensopivuuden direktiivi 89/336/EEC |
| EPOS | Energiapoliittiset linjaukset |
| HKR | Helsingin kaupungin rakennusvirasto |
| IEC | International Electrotechnical Commission |

| | |
|-----------------|---|
| IHD | Individual Harmonic Distortion – harmoninen yksittäissäro |
| IHD_h | h:nnen yliaaltokomponentin harmoninen yksittäissäro |
| $IHD_{I_{max}}$ | suurin sallittu harmonisen yliaaltovirran arvo prosentteina perustaajuisesta virrasta |
| $IHD_{U_{max}}$ | suurin sallittu harmonisen yliaaltojännitteen arvo prosentteina perustaajuisesta jännitteestä |
| KETS | Kuntien energiatehokkuussopimus |
| LED | Light-Emitted Diode – loistediode |
| LVD-direktiivi | Low Voltage Directive – pienjännitedirektiivi 73/23/EEC |
| SFS | Suomen Standardisoimisliitto SFS ry |
| THD | Total Harmonic Distortion – harmoninen kokonaissäro |
| UPS | Uninterruptible Power Supply – varavoimalähde |

Käsitteet

| | |
|----------------------------|---|
| jakelujännite | jännitteen tehollisarvo liittämisskohdassa tietyssä ajankohtana ja mitattuna tietyllä aikavälillä |
| jakelujännitteen taajuus | jakelujännitteen perusaallon toistojen lukumäärä mitattuna tietyllä aikavälillä |
| keskijänniteverkko | sähköverkko, jonka jännitteen nimellinen tehollisarvo on suurempi kuin 1 kV ja pienempi tai yhtä suuri kuin 36 kV |
| kiinteistön sähköverkko | 50 Hz:n ja 400 V:n kiinteistön sisäinen sähköverkko, jonka tehtävänä on toimittaa sähköä turvallisesti sitä tarvitseville kuormille |
| liittämiskohta | jakeluverkon kohta, jossa sähköenergia siirtyy sopimuksen mukaisesti sopimusosapuolten välillä |
| perusaalto | siniaalto, jonka taajuus on verkossa käytetty perustaajuus |
| perustaajuus | verkossa käytetty taajuus (Suomessa 50 Hz) |
| perustaajuinen komponentti | Fourier-sarjan komponentti, jonka taajuus on verkon perustaajuus |
| pienjänniteverkko | sähköverkko, jonka jännitteen nimellinen tehollisarvo on pienempi tai yhtä suuri kuin 1 kV |
| suurjänniteverkko | sähköverkko, jonka jännitteen nimellinen tehollisarvo on suurempi kuin 36 kV ja pienempi tai yhtä suuri kuin 150 kV |

| | |
|----------------------|--|
| sähköverkko | toisiinsa liitetyistä sähköjohdoista, sähköasemista sekä muista tarvittavista sähkölaitteista ja sähkölaitteistoista muodostettu kokonaisuus, joka on tarkoitettu sähkön siirtoon tai jakeluun |
| sähköverkon käyttäjä | osapuoli, joka joko käyttää sähköä verkosta tai tuottaa sitä verkkoon |
| verkonhaltija | (sähköverkkoluvan haltija) yhteisö tai laitos, jolla on hallinnassaan sähköverkkoa ja joka harjoittaa luvanvaraista sähköverkkotoimintaa |
| vertailujännite | jakelujärjestelmän nimellisjännite tai sopimuksen mukainen jännite |

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Sähkömarkkinalain 17.3.1995/386 [1] mukaan ”Verkonhaltijan tulee ylläpitää, käyttää ja kehittää sähköverkkoaan sekä yhteyksiä toisiin verkkoihin asiakkaiden kohtuullisten tarpeiden mukaisesti ja turvata osaltaan riittävän hyvälaatuisen sähkön saanti asiakkaille.” Riittävän hyvälaatuinen sähkö sähköverkon käyttäjän liittymiskohdassa yleiseen sähköverkkoon on määritelty jännitteen osalta ”Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet” -standardissa SFS-EN 50160 [2], jossa kuvataan rajat tai arvot, joiden sisällä sähköverkon käyttäjä voi olettaa liittämiskohdan jännitteen ominaisuuksien pysyvän eurooppalaisen jakeluverkon alueella [2, s. 6].

Sähkön laatu tarkoittaa verkkoyhtiön syöttämän jännitteen sopivuutta sähköverkon käyttäjän laitteiden tarkoituksenmukaiseen toimintaan [3, s. 2]. Sähkön laatua voivat heikentää erilaiset sähkömagneettiset häiriöt, kuten jännitteen keskeytykset, taajuuspoikkeamat, transienttiylijännitteet sekä harmoniset yliaaltojännitteet. Häiriöt voivat olla sekä verkonhaltijan sähköverkon puolella tapahtuvia että sähköverkon käyttäjän eli asiakkaan toiminnasta aiheutuvia. [4, s. 2-4]

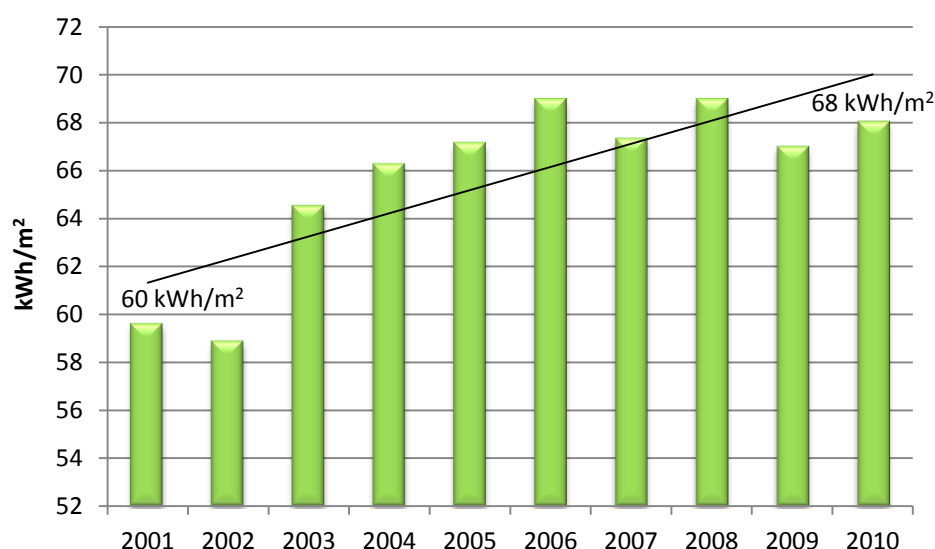
Viime vuosina kiinnostus harmonisia yliaaltojännitteitä kohtaan on kasvanut johtuen niiden määrän jatkuvasta kasvusta yleisissä sähkönjakeluverkoissa. Syynä tähän ovat sähköverkon käyttäjien yliaaltojännitteitä synnyttävän epälineaarisen kuormituksen määrän ja sen osuuden jatkuva lisääntyminen. [5, s. 9] Sen lisäksi, että epälineaariset kuormat synnyttävät harmonisia yliaaltojännitteitä sähköverkkoon, ovat ne itse myös hyvin herkkiä aiheuttamilleen häiriöille. Epälineaaristen kuormien, kuten pyörivien sähkökoneiden, muuntajien, valokaariuunien, purkaus- ja loistelamppujen, tietokoneiden sekä televisioiden, aiheuttamat harmoniset yliaaltojännitteet leviävät helposti sähköverkkoa pitkin myös muille sähköverkon käyttäjille [6, s. 3 ja 7, s. 3].

1.2 Tutkimusongelma

Helsingin kaupunki on sitoutunut energiatehokkuuden parantamiseen sekä kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen monin eri sopimuksin ja ohjelmin. Näistä tärkeimpiä ovat kuntien energiatehokkuussopimus (KETS), kaupunginjohtajien energia- ja ilmastopopimus (Covenant of Mayors) sekä Helsingin kaupungin energiapoliittiset linjaukset (EPOS). [8]

Kuntien energiatehokkuussopimus on solmittu työ- ja elinkeinoministeriön kanssa (4.12.2007) ja sen päätavoitteena on 9 %:n kiinteä energiansäästö (laskettuna vuoden 2005 kulutuksesta) vuoden 2016 loppuun mennessä. Kaupunginjohtajien energia- ja ilmastopopimuksen (7.1.2009/10.2.2009) mukaan kaupungin tulee pienentää CO₂-päästöjä vähintään 20 % vuoteen 2020 mennessä. Vertailuvuotena on vuosi 1990. Helsingin kaupungin energiapoliittisten linjausten (30.1.2008) tavoitteena on pienentää kasvihuonekaasupäästöjä 20 % ja lisätä uusiutuvien energialähteiden osuus 20 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Energiapoliittisten linjausten vertailuvuotena on myös vuosi 1990. [8] Näiden sitoumusten tavoitteiden saavuttaminen vaatii uusien energiatehokkaiden teknologioiden käyttöönottoa sekä investointia uusiutuviin ja hajautettuihin energiamuotoihin.

Koska Helsingin kaupungin kokonaisenergiasta yli 80 % kuluu kaupungin omistamissa rakennuksissa, suurin säästöpotentiaali löytyy rakennussektorilta. Rakennussektorin energiankulutuksesta lämpöenergian kulutus on viime vuosikymmenenä laskenut, mutta sähköenergian kulutus on sitä vastoin jatkanut tasaista nousua. Helsingin kaupungin rakennussektorin sähköenergian kulutus oli vuonna 2001 415 GWh, kun taas vuonna 2010 vastaava luku oli jo 473 GWh. Kun edellisissä luvuissa huomioidaan kaupungin rakennuskannan kehitys, saadaan vastaaviksi sähköenergian ominaiskulutuksiksi 60 kWh/m² vuonna 2001 ja 68 kWh/m² vuonna 2010. Vuoden 2010 sähköenergian ominaiskulutus on siis 13,3 % suurempi kuin vuoden 2001 sähköenergian ominaiskulutus. [9] Kuvassa 1 on esitetty Helsingin kaupungin rakennussektorin sähköenergian ominaiskulutus vuosina 2001–2010 sekä lineaarinen trendiviiva, joka kuvaa sähköenergian ominaiskulutuksen kehitystä. Sähköenergian kulutuksen nousun hidastaminen on täten ratkaiseva tekijä energiatehokkuuden parantamiseen ja kasvihuonepäästöjen vähentämiseen tähtäävien sopimusten ja ohjelmien tavoitteiden saavuttamisessa.



Kuva 1. Helsingin kaupungin rakennussektorin sähköenergian ominaiskulutus vuosina 2001–2010 [9].

Julkisten rakennusten suurimmat sähköenergian kulutusryhmät ovat ilmanvaihto ja valaistus, joten hidastaakseen sähköenergian kulutuksen nousua on tärkeä keskittyä ilmanvaihdon ja valaistuksen sähköenergian käyttöön. [8] Helsingin kaupungin palvelurakennusten matalaenergiarakentamisohjeessa onkin ohjattu ilmanvaihdon ja valaistuksen osalta uusien energiatehokkaiden teknologioiden, kuten EC-moottoroitujen puhaltimien ja LED-valaistuksen, käyttöön. Edellisten lisäksi ohjeessa on otettu kantaa aurinko- ja tuulisähkön käyttöön uudis- ja korjausrakentamisessa. [10, s.7-8; 11, s.10; 12, s. 13]

Helsingin kaupunki on kokeillut viimeisen kahden vuoden aikana EC-moottoreiden, LED-valaistuksen ja aurinkosähköjärjestelmien käyttöä kaupungin omistamissa kiinteistöissä. Nämä uudet energiatehokkaat teknologiat tuovat kuitenkin mukanaan runsaasti epälineaarista kuormitusta, jonka on edellä todettu aiheuttavan harmonisia yliaaltojännitteitä sähköverkkoon. Tästä johtuen Helsingin kaupunki on kiinnostunut tutkimaan käyttämiensä uusien teknologioiden aiheuttamia harmonisia yliaaltojännitteitä.

1.3 Tutkimuksen tavoite

Diplomityön päätavoitteena on tutkia Helsingin kaupungin kiinteistöissä sijaitsevien aurinkosähköjärjestelmän, EC-moottorin ja LED-valaistuksen tuottamia harmonisia yliaaltojännitteitä. Harmonisia yliaaltojännitteitä tutkitaan suorittamalla standardin SFS-EN 50160 ("Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet") mukaiset sähkön laadun mittaukset. Mittaukset suoritetaan kolmessa Helsingin kaupungin koulussa. Mitattuja harmonisten yliaaltojännitteiden arvoja verrataan standardissa SFS-EN 50160 sallittuihin arvoihin. Vertailulla selvitetään täyttääkö aurinkosähköjärjestelmän, EC-moottorin ja LED-valaistuksen jännitteiden sähkön laatu standardissa esitetyt raja-arvot harmonisten yliaaltojen osalta.

Diplomityön osatavoitteena on tutkia Helsingin kaupungin kiinteistöissä sijaitsevien aurinkosähköjärjestelmän, EC-moottorin ja LED-valaistuksen tuottamia harmonisia yliaaltovirtoja. Harmonisten yliaaltovirtojen lisäksi diplomityön osatavoitteena on tutkia myös harmonisia yliaaltotehoja, joiden avulla määritetään harmonisten yliaaltovirtojen kulkusuunta. Harmoniset yliaaltovirrat ja -tehot mitataan edellä kuvattujen standardin SFS-EN 50160 mukaisten sähkön laadun mittausten yhteydessä. Mitattuja harmonisten yliaaltovirtojen arvoja verrataan LED-valaistuksen osalta standardissa IEC 61000-3-2 ("Electromagnetic compatibility – Parts 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions") sallittuihin arvoihin. Vertailun avulla selvitetään täyttääkö LED-valaistuksen virran sähkön laatu standardissa esitetyt raja-arvot. Aurinkosähköjärjestelmän ja EC-moottorin osalta vertailua standardiin ei ole mahdollista tehdä, joten näistä tutkimuskohteista mitattuja harmonisia yliaaltovirtoja tarkastellaan ilman standardin raja-arvoja.

1.4 Tutkimuksen rakenne

Diplomityö koostuu teoreettisesta ja empiirisestä osasta. Diplomityön teoreettisen osan alussa määritellään sähkön laadun käsite ja perehdytään sen jälkeen yleisellä tasolla sähkön laadun osatekijöihin eli sähkön laatua heikentäviin sähkömagneettisiin häiriöihin. Tämän jälkeen diplomityössä syvennyttään tarkastelemaan sähkön laadun osatekijöistä ainoastaan työn tutkimuskohteena olevia harmonisia yliaaltoja. Harmonisia yliaaltojen tutkiminen aloitetaan tutustumalla Fourier-sarjaan, jonka avulla harmoniset yliaallot voidaan mallintaa matemaattisesti. Seuraavaksi tutustutaan harmonisten yliaaltojen arvioinnin tunnuslukuihin – yksittäis- ja kokonaissäröön sekä yliaaltojen yksittäissäröjen spektriesitykseen. Harmonisten yliaaltojen tarkastelun lopussa esitellään vielä yliaaltojen lähteet, haittavaikutukset yleisimmille sähkölaitteille sekä yliaaltojen suodatustavat.

Tämän jälkeen diplomityön teoreettisessa osassa tutustutaan uusiin yleistuviin teknologioihin, joiden tuottamia harmonisia yliaaltoja tutkitaan diplomityön empiirisessä osassa. Teknologiat ovat aurinkosähköjärjestelmä, EC-moottori ja LED-valaistus. Aurinkosähköjärjestelmästä perehdytään sen toimintaperiaatteeseen, komponentteihin, eri aurinkojärjestelmien tyyppeihin sekä järjestelmän käytön tuomiin etuihin. EC-moottoreista ja LED-valaistuksesta perehdytään niiden toimintaperiaatteisiin, kytkentöihin sähköverkkoon ja niiden käytön tuomiin etuihin. Seuraavaksi esitellään diplomityössä käytetyt standardit - SFS-EN 50160 ja IEC 61000-3-2 sekä niissä sallitut harmonisten yliaaltojännitteiden ja -virtojen arvot.

Diplomityön empiirisen osan alussa tutustutaan työssä suoritettuihin mittauksiin. Tässä yhteydessä esitellään diplomityön tutkimuskohteet eli Helsingin kaupungin kolmessa koulussa sijaitsevat aurinkosähköjärjestelmä, EC-moottori ja LED-valaistus, mittauksissa käytetyt laitteet sekä mittausmenetelmä. Tämän jälkeen esitetään diplomityön tutkimustulokset tarkastellen jännitteen, virran ja tehon harmonisia yliaaltoja erikseen kunkin tutkimuskohteen osalta. Tutkimustulosten esittelyn yhteydessä verrataan myös mitattuja harmonisten yliaaltojen arvoja standardissa sallittuihin harmonisten yliaaltojen arvoihin. Diplomityön lopussa tehdään työn keskeisistä tutkimustuloksista johtopäätökset, suoritetaan tutkimustulosten luotettavuusanalyysi ja ehdotetaan jatkotutkimusten aihealueet.

2 Sähkön laatu

2.1 Määritelmä

Sähkön laadulle on olemassa monta erilaista määritelmää, mutta kukin niistä antaa suurin piirtein samanlaisen käsityksen siitä, mitä sähkön laatu on. Ehkä yksinkertaisin ja tiivein määritelmä voisi olla seuraava: ”Sähkön laatu on joukko sähköisiä rajoja, jotka sallivat tietyn laitteen toimia tarkoituksenmukaisella tavalla ilman merkityksellisiä suorituskyvyn tai odotettavissa olevan eliniän menetyksiä” [13, s. 1]. Sähkön laadun poikkeamat vaikuttavat siis suoraan edellä mainittuihin sähkölaitteiden ominaisuuksiin. Toisin sanoen sähkön laatu on verkkoyhtiön syöttämän jännitteen sopivuus sähköverkon käyttäjän laitteiden tarkoituksenmukaiseen toimintaan [3, s. 2].

Tarpeeksi hyvä sähkön laatu riippuu täysin sähkön loppukäyttäjistä: toiselle sähkölaitteelle sähkön laatu voi olla riittävä, toiselle sama sähkön laatu voi olla riittämätön. Sähkölaitteet muuttuvat yhä pienemmiksi ja herkimmiksi sähkön laadun poikkeamille johtuen elektroniikan lisääntymisestä. Esimerkiksi kenkälaatikon kokoinen elektroninen ohjain voi ohjata tehokkaasti yli MW:n tehoista moottoria. Moottori kestää hyvin erilaisia poikkeuksia sähkön laadussa, mutta ohjain ei. Tuloksena on moottorijärjestelmä, joka on hyvin herkkä sähkön laadun häiriöille. [13, s. 2]

2.2 Ideaalinen vaihtojännitteen sähkön laatu

Vaihtojännitteen sähkön laadun ideaalitilanteessa energialähteen sähkökuormalle syöttämän jännitteen aaltomuoto on sinimuotoinen [14, s. 2]. Sinimuotoinen jännite ajan funktiona voidaan esittää seuraavan yhtälön avulla

$$u(t) = U \sin(\omega t) \quad , \quad (1)$$

missä

U on jännitteen amplitudi
 ω on kulmanopeus
 t on aika.

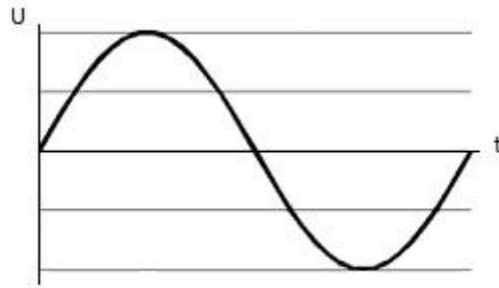
Kulmanopeus saadaan laskettua seuraavasti

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T} \quad , \quad (2)$$

missä

f on taajuus
 T on jaksonaika.

Kun tämä sinimuotoinen vaihtojännite syötetään sähkökuormaan, kuorman virran taajuus ja amplitudi tulevat riippumaan kuorman impedanssista ja kuorman muista ominaisuuksista. [14, s. 2] Kuvassa 2 on esitetty ideaalinen vaihtojännitteen aaltomuoto.



Kuva 2. Ideaalinen vaihtojännitteen aaltomuoto [15, muokattu].

2.3 Sähkön laadun ongelmat

Sähkön laadun ongelmat ilmenevät yleensä silloin, kun sähkölaitteita syötetään jollain lailla epätäydellisellä jännitteellä [16, s. 6]. Kasvava kiinnostus sähkön laatua kohtaan johtuu useista seikoista. Sähkön laadun ongelmat voivat vaikuttaa sähkön mittauksen virheettömyyteen ja ne voivat aiheuttaa suojareiden toimintahäiriöitä. Tämän lisäksi heikentynyt sähkön laatu voi myös johtaa sähkölaitteiden häiriöihin tai vaurioihin, tuottaen näin tuottavuuden menetyksiä. Tuottavuuden menetykset voivat puolestaan johtaa kasvaneisiin kustannuksiin. Sähkön laadun ongelmat voivat edellisten seikkojen lisäksi johtaa myös laitteiden sähkömagneettisen yhteensopivuuden ongelmiin ja kohinaan. [14, s. 2]

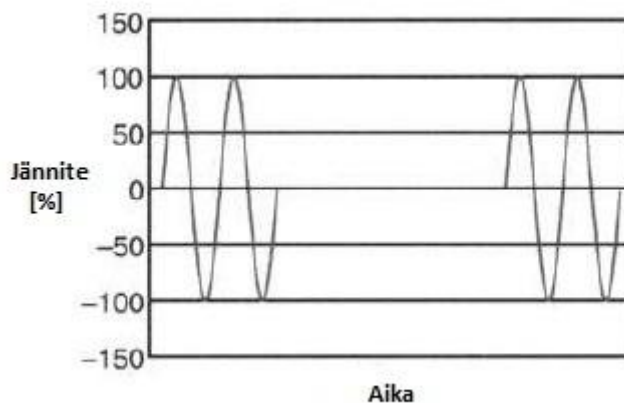
Sähkön laatuun vaikuttavat seuraavat osatekijät:

- käyttökeskeytykset;
- jännitekuopat;
- jännitteen nousut;
- transienttiylijännitteet;
- jännitetason vaihtelu;
- taajuuspoikkeamat;
- jännite-epäsymmetria;
- harmoniset yliaaltojännitteet;
- epäharmoniset yliaaltojännitteet;
- verkon signaalijännitteet.

2.4 Sähkön laadun osatekijät

2.4.1 Käyttökeskeytykset

Käyttökeskeytys on tilanne, jossa jännite on liittämiskohdassa alle 5 % vertailujännitteestä. Vertailujännite on jakelujärjestelmän nimellisjännite tai sopimuksen mukainen jännite. Useampivaiheisessa verkossa käyttökeskeytys on tilanne, jossa kaikkien vaiheiden jännite laskee alle 5 % vertailujännitteestä. Mikäli useampivaiheisessa verkossa vain yhden tai muutamien vaiheiden jännite laskee alle 5 %, käsitellään tällainen tilanne jännitekuoppa (jännitekuopat käsitellään seuraavassa alaluvussa). [2, s. 14] Kuvassa 3 on esitetty jännite ajan funktiona käyttökeskeytyksen aikana.



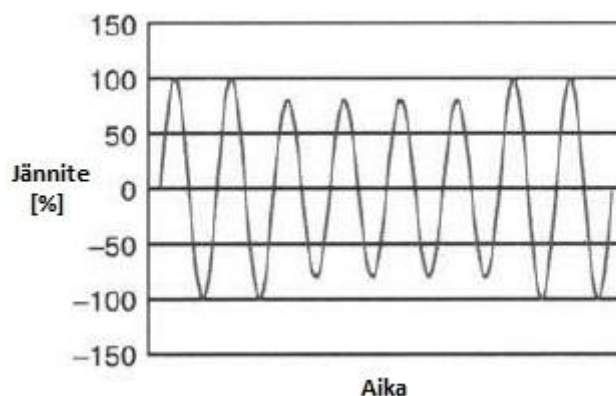
Kuva 3. Jännite ajan funktiona käyttökeskeytyksen aikana [17, s. 43/3, muokattu].

Käyttökeskeytykset voidaan jakaa suunniteltuihin keskeytyksiin ja häiriökeskeytyksiin. Suunnitellut keskeytykset johtuvat yleensä sähkölaitoksen suunnitelluista verkon korjaus- tai rakennustöistä ja niistä ilmoitetaan sähköverkon käyttäjille etukäteen. Toisinaan suunnitellut keskeytykset voivat johtua myös siitä, että verkonhaltija joutuu rajoittamaan sähkön toimitusta tuotanto- ja siirtokapasiteettiongelmiin vuoksi. [2, s. 14 ja 4, s. 2]

Häiriökeskeytykset aiheutuvat odottamattomista pysyvistä tai ohimenevistä vioista, jotka liittyvät yleensä ulkopuolisiin tapahtumiin, laitevikoihin tai häiriöihin. Esimerkiksi keskijänniteverkoissa yleisin syy tapahtuviin häiriökeskeytyksiin ovat tuulen ja myrskyn aiheuttamat keskeytykset avojohdoissa. Tavallisesti häiriökeskeytyksen aiheuttaa kytkinlaitteen käyttö tai suojalaitteiden toiminta. Häiriökeskeytykset voidaan edelleen jakaa pitkiin yli kolmen minuutin kestoisiin keskeytyksiin ja lyhyisiin enintään kolmen minuutin kestoisiin keskeytyksiin. [2, s. 14 ja 18, s. 28]

2.4.2 Jännitekuopat

Jännitekuoppa on jakelujännitteen tehollisarvon tilapäinen aleneminen jossakin jakelujärjestelmän kohdassa alle 90 %:n vertailujännitteestä. Useampivaiheisessa verkossa jännitekuoppa alkaa silloin, kun jännite yhdessä vaiheessa laskee alle 90 %:n vertailujännitteestä ja päättyy silloin, kun jännite nousee kaikissa vaiheissa takaisin yli 90 %:n vertailujännitteestä. Jännitekuopan kestoaika on tavallisesti 10 millisekunnista 10 minuuttiin. Jännitekuopan suuruus määritellään jännitekuopan jäännösjännitteen suhteena vertailujännitteeseen. Jäännösjännite on jännitteen tehollisarvon miniarvo, joka mitataan jännitekuopan keston aikana. [2, s. 16] Kuvassa 4 on esitetty jännite ajan funktiona jännitekuopan aikana.

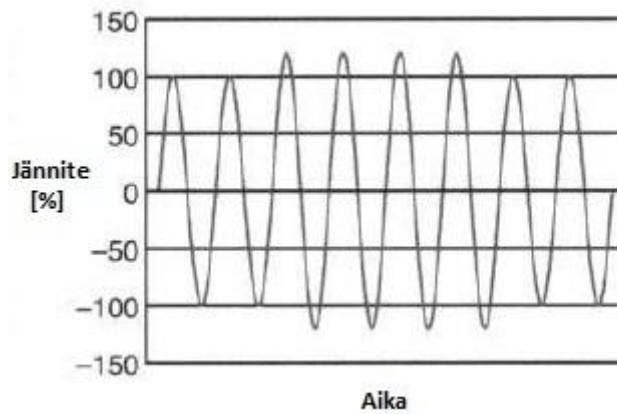


Kuva 4. Jännite ajan funktiona jännitekuopan aikana [17, s. 43/3, muokattu].

Jännitekuopat liittyvät tyypillisesti verkon oikosulun syntymiseen ja sen päättymiseen tai muuhun järjestelmän tai siihen liitettyjen asennusten ottamaan äärimmäisen suureen virran kasvuun [2, s. 16]. Täten jännitekuoppia voivat aiheuttaa esimerkiksi siirtoverkossa esiintyvät viat, raskaat käynnistyvät kuormat, luonnonilmiöt, metsän eläimet tai suuret verkossa siirtyvät tehot. Jännitekuoppia esiintyy kaikilla jännitetasoilla, mutta eniten niitä esiintyy maaseudun pienjänniteverkoissa johtuen heikoimmista verkoista ja pitkistä etäisyyksistä. [18, s. 33]

2.4.3 Jännitteen nousut

Jännitteen nousu on vastakohta jännitekuopalle ja sitä kutsutaan myös tilapäiseksi käyttötaajuiseksi ylijännitteeksi. Jännitteen nousu on jakelujännitteen tehollisarvon tilapäinen nousu jakeluverkon tietyssä kohdassa 110 % vertailujännitteen yläpuolelle. Jännitteen nousun kestoaika on tavallisesti 10 millisekunnista 1 minuuttiin. Kuvassa 5 on esitetty jännite ajan funktiona jännitteen nousun aikana. [2, s. 16–18]

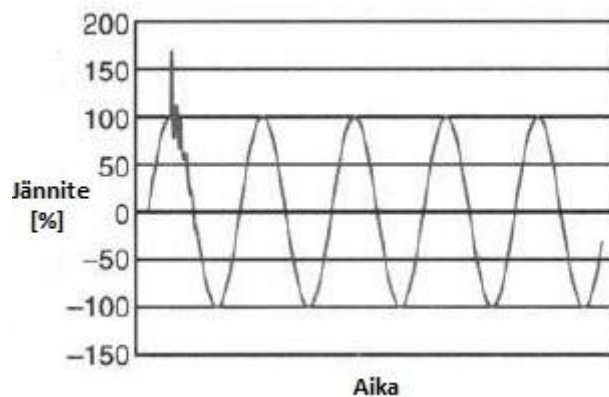


Kuva 5. Jännite ajan funktiona jännitteen nousun aikana [17, s. 43/3, muokattu].

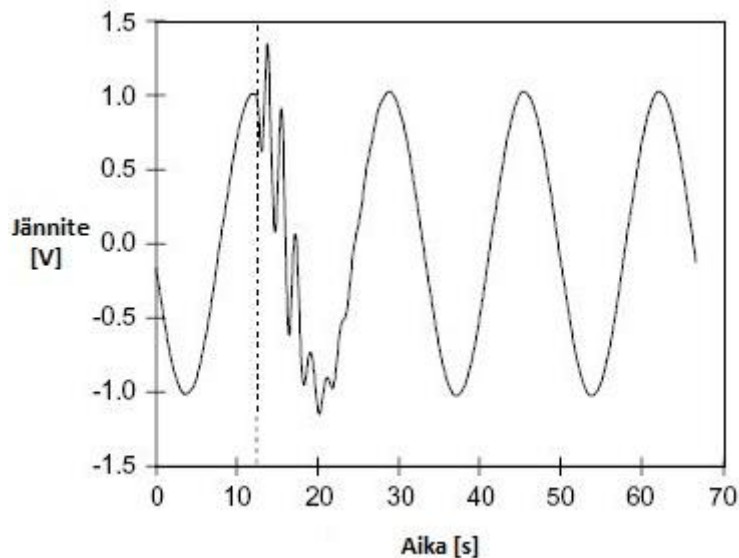
Jännitteen nousuja saattaa esiintyä jännitteisten johtimien välillä tai jännitteisten johtimien ja maan välillä. Riippuen jakelujärjestelmän maadoitustavasta viat saattavat aikaansaada ylijännitteitä terveiden vaiheiden ja maadoitettujen osien välille. [2, s. 16] Kuten jännitekuopat, jännitteen nousutkin aiheutuvat järjestelmän vikatilanteista, mutta ne ovat huomattavasti harvinaisempia kuin jännitekuopat. Järjestelmän vikatilanteessa jännitteen nousun suuruus riippuu vian sijainnista, järjestelmän impedanssista sekä maadoitustavasta. Järjestelmän vikatilanteiden lisäksi jännitteen nousuja aiheuttavat suurien kuormien irtikytkeminen verkosta ja suurien kondensaattorien kytkeminen verkkoon. [7, s.14]

2.4.4 Transienttiylijännitteet

Transienttiylijännite on lyhytaikainen impulsiivinen tai värähtelevä ylijännite, joka tavallisesti vaimenee voimakkaasti ja jonka kesto on enintään muutamia millisekunteja. Impulsiivinen transienttiylijännite saa joko positiivisia tai negatiivisia jännitteen arvoja. Värähtelevä transienttiylijännite sitä vastoin sisältää sekä positiivisia että negatiivisia jännitteen arvoja. Transienttiylijännitteen nousuaika voi vaihdella alle mikrosekunnista muutamiin millisekunteihin. Kuvassa 6 on esitetty jännite ajan funktiona impulsiivisen transienttiylijännitteen seurauksena ja kuvassa 7 on esitetty jännite ajan funktiona värähtelevän transienttiylijännitteen seurauksena. [2, s. 16 ja 7, s. 7-8]



Kuva 6. Jännite ajan funktiona impulsiivisen transienttiylijännitteen seurauksena [17, s. 43/3, muokattu].



Kuva 7. Jännite ajan funktiona värähtelevän transienttiylijännitteen seurauksena [19, muokattu].

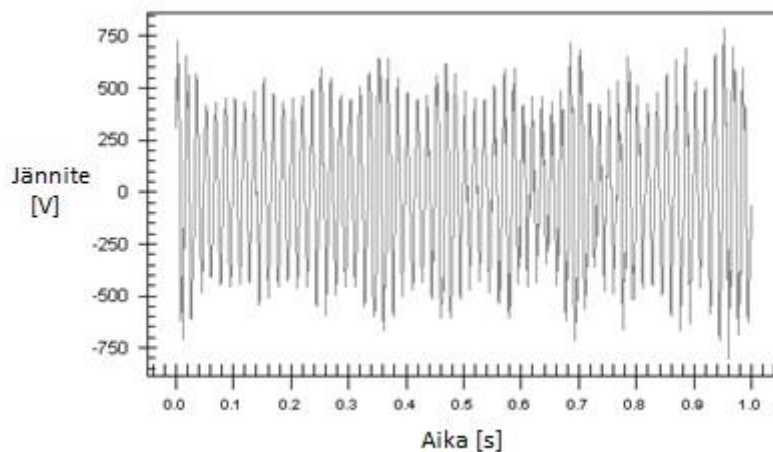
Impulsiiviset transienttiylijännitteet aiheutuvat yleensä salamoinnista ja värähtelevät transienttiylijännitteet järjestelmässä suoritettujen kytkentätoimenpiteiden, kuten kondensaattoreiden, kuormien ja suojalaitteiden kytkentätoimenpiteiden, seurauksena. Värähtelevien transienttiylijännitteiden amplitudit ovat yleensä pienempiä, mutta energiasisältö suurempi kuin impulsiivisilla transienttiylijännitteillä. Tämä johtuu värähtelevien transienttiylijännitteiden pidemmästä kestoajasta. [2, s. 28; 3, s. 21; 14, s. 30–33]

2.4.5 Jännitetason vaihtelu

Jännitetason vaihtelu tarkoittaa jännitteen systemaattista vaihtelua tai sarjaa satunnaisia jännitemuutoksia, joiden suuruus poikkeaa normaalista jännitteen vaihteluvälistä. Jännitetason vaihtelun voi aiheuttaa mikä tahansa kuorma, jolla on merkittäviä jaksollisia vaihteluita, erityisesti reaktiivisessa komponentissaan. [7, s. 22]

Ehkä tunnetuin jännitetason vaihtelun aiheuttama ilmiö on välkyntä. Välkyntä on valonlähteen luminanssin tai spektrijakautuman muutosten aiheuttama näköaistimuksen ajallinen vaihtelu. [2, s. 18] Välkyntä on subjektiivinen suure, sillä sen näkyvyys havaitsijalle riippuu havaitsijan näkökyvyn herkkyydestä [13, s. 29]. Valonlähteiden lisäksi välkyntä aiheuttaa ongelmia myös tietokoneiden toiminnalle ja kommunikaatiolaitteille [4, s. 3].

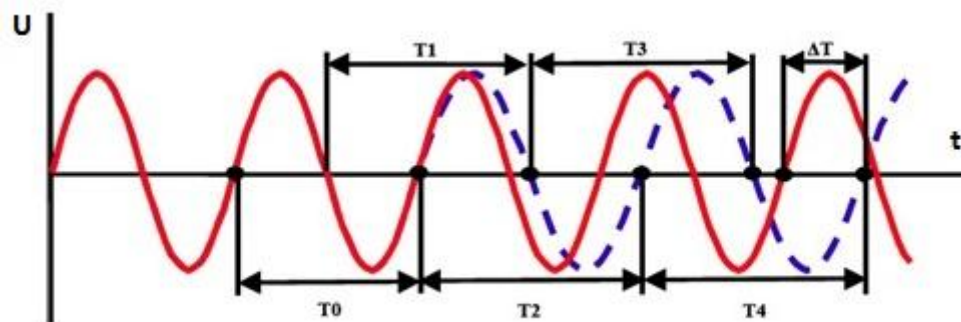
Jännitetason vaihteluiden yleisin aiheuttaja on valokaariuuni [7, s. 22]. Lisäksi jännitetason vaihteluita aiheuttavat myös syklokonvertterit, pistehitsaus, kuljettimien moottorit ja muut järjestelmät, joiden virta ei ole tahdistettu verkon taajuuteen. [4, s. 3 ja 14, s. 9] Kuvassa 8 on esitetty jännite ajan funktiona valokaariuunin aiheuttaman välkyntän seurauksena.



Kuva 8. Jännite ajan funktiona valokaariuunin aiheuttaman välkynnän seurauksena. [16, s. 14, muokattu].

2.4.6 Taajuuspoikkeamat

Taajuuspoikkeama on jakelujännitteen taajuuden ja nimellistaajuuden välinen ero. Taajuuspoikkeaman kesto voi olla muutamista jaksoista muutamiin tunteihin. Suomessa kaikkien sähköverkkojen nimellistaajuus on 50 Hz. Standardin SFS-EN 50160 mukaan yhteiskäyttöverkkojen jakelujännitteen perustaajuuden on oltava välillä 49,5...50,5 Hz 99,5 % ajasta ja välillä 47 Hz...52 Hz 100 % ajasta. Kuvassa 9 on esitetty jännite ajan funktiona taajuuspoikkeaman seurauksena. [2, s. 20 ja 7, s. 75]



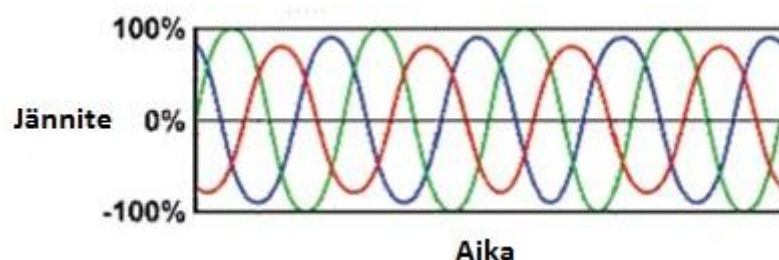
Kuva 9. Jännite ajan funktiona taajuuspoikkeaman seurauksena. [20, muokattu].

Sähköverkon jakelujännitteen taajuus liittyy suoraan sähköverkkoa syöttävien generaattorien pyörimisnopeuteen. Kun kuorman ja tuotannon tasapaino muuttuu, aiheuttaa tämä heti lieviä taajuuden poikkeamia. Näin ollen taajuuspoikkeamien pääasialliset aiheuttajat ovat nopeat kuormitusmuutokset yksittäisillä generaattoreilla, huonot generaattorien ohjaus- ja säätölaitteet sekä joskus myös epästabiili ja ylikuormitettu maaseutuverkko. Taajuuspoikkeama ja sen kesto riippuu kuorman ominaisuuksista ja sähköntuotantojärjestelmän vasteesta kuorman muutoksiin. [4, s. 2 ja 7, s. 23]

Taajuuspoikkeamat ovat nykyisin melko harvinaisia erityisesti suurien sähkölaitosten jakelualueilla. Taajuuspoikkeamia esiintyykin yleensä sähköverkon saarekekäytössä, varavoimakonekäytöissä ja pienillä jakelualueilla, kuten saarilla. [4, s. 2]

2.4.7 Jännite-epäsymmetria

Jännite-epäsymmetria on monivaihejärjestelmän tilanne, jossa vaihejännitteiden tehollisarvot tai niiden väliset kulmat eivät ole samat. Epäsymmetrian suuruus ilmaistaan yleensä nolla- ja vastakomponenttien suhteena myötäkomponenttiin. Kuvassa 10 on esitetty jännite ajan funktiona jännite-epäsymmetrian seurauksena. [2, s. 18–22]

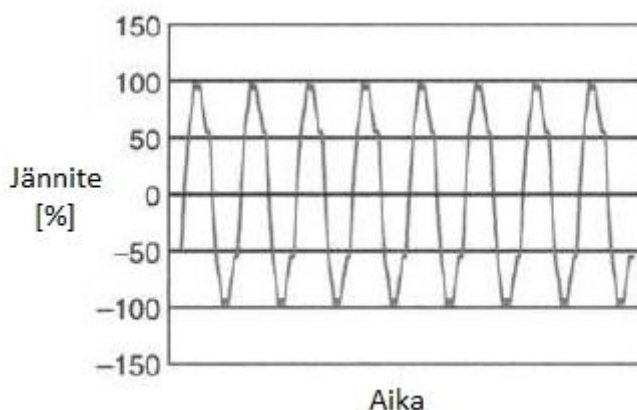


Kuva 10. Jännite ajan funktiona jännite-epäsymmetrian seurauksena [21, muokattu].

Jännite-epäsymmetria aiheutuu useimmiten verkon epäsymmetrisestä kuormituksesta, mikä on yleensä maaseudun ongelma. Lisäksi jännite-epäsymmetria voi syntyä johtuen yhden vaiheen palaneesta sulakkeesta verkossa tai kompensointiparistossa. Epäsymmetria suurentaa sähkömoottoreiden roottorihäviöitä sekä pienentää niiden momenttia. Lisäksi jännite-epäsymmetria saattaa häiritä joitakin elektronisia laitteita, kuten tietokoneita. [4, s. 5 ja 17, s. 4]

2.4.8 Harmoniset yliaaltojännitteet

Harmoninen yliaaltojännite on sinimuotoinen jännite, jonka taajuus on jakelujännitteen perusaallon taajuus kokonaisluvulla kerrottuna. Summautuessaan perustaajuisen jakelujännitteen kanssa harmoniset yliaaltojännitteet aiheuttavat jännitesärön. Harmonisia yliaaltojännitteitä voidaan arvioida joko yksittäin, niiden suhteellisen amplitudin suhteella perustaajuisen jännitteen amplitudiin – harmonisella yksittäissäröllä, tai yhdessä – harmonisella kokonaissäröllä. [2, s. 10 ja 7, s. 19] Kuvassa 11 on esitetty jännite ajan funktiona harmonisten yliaaltojännitteiden seurauksena.



Kuva 11. Jännite ajan funktiona harmonisten yliaaltojännitteiden seurauksena [17, s. 43/4, muokattu].

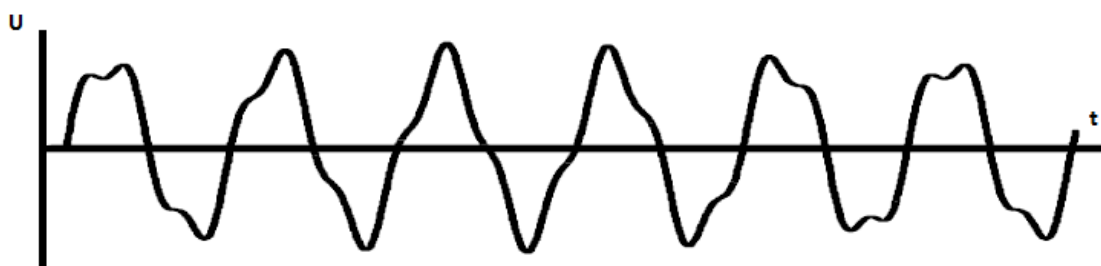
Harmoniset yliaaltojännitteet aiheutuvat pääasiassa jakelujärjestelmään kytketyistä tehoelektroniikkaa sisältävistä sähkönkäyttäjien epälineaarisista kuormista.

Epälineaarisia kuormia ovat esimerkiksi tasasuuntaajat, taajuusmuuttajat, hakkuriteholähteet, tyristoriohjatut kuormat, syklokonvertterit, muuntajat sekä purkaus- ja loistelamput. Epälineaaristen kuormien verkosta ottamat tai verkkoon syöttämät virrat eivät ole sinimuotoisia, vaan harmonisia yliaaltovirtoja. Nämä harmoniset yliaaltovirrat aiheuttavat verkon impedanssien kautta kulkiessaan harmonisia yliaaltojännitteitä. Yliaaltojännitteet taas aiheuttavat muun muassa häviöiden kasvua verkossa. [2, s. 10; 4, s. 4; 18, s. 16]

Harmonisia yliaaltoja tarkastellaan tässä esiteltyä tarkemmin luvussa 3.

2.4.9 Epäharmoniset yliaaltojännitteet

Epäharmoninen yliaaltojännite on sinimuotoinen jännite, jonka taajuus on harmonisten yliaaltojen välissä, eli epäharmonisen yliaaltojännitteen taajuus ei ole perusaallon taajuus kokonaisluvulla kerrottuna. Epäharmoniset yliaaltojännitteet voivat esiintyä joko erillisinä taajuuksina tai mikäli niiden taajuudet ovat hyvin lähellä toisiaan, ne voivat esiintyä samanaikaisesti muodostaen laajan spektrikaistan. [2, s. 10 ja 7, s. 20] Kuvassa 12 on esitetty jännite ajan funktiona epäharmonisten yliaaltojännitteiden seurauksena.



Kuva 12. Jännite ajan funktiona epäharmonisten yliaaltojännitteiden seurauksena [4, s. 4, muokattu].

Epäharmonisia yliaaltojännitteitä syntyy erittäin epälineaarisissa laitteissa, joiden ottama virta vaihtelee jännitejaksoista riippumattomasti. Pääasialliset aiheuttajat ovat staattiset taajuusmuuttajat, syklokonvertterit ja induktiouunit. Epäharmonisten yliaaltojännitteiden vaikutuksia ei ole tutkittu kovin paljon, mutta niiden tiedetään ainakin vaikuttavan voimajohtojen kantataajuusmerkinantoon sekä aiheuttavan välkyntää näyttölaitteisiin, kuten katosädeputkiin ja häiriöitä verkkokäskylaitteissa. [2, s. 22; 7, s. 20; 18, s. 16]

2.4.10 Verkon signaalijännitteet

Verkon signaalijännite on jakelujännitteeseen summautunut signaali viestin siirtämiseksi yleisessä jakeluverkossa ja asiakkaan tiloihin. Yleisestä jakeluverkosta voidaan erotella kolme signaalijännitteen tyyppiä. Verkkokäskysignaalit ovat verkkojännitteeseen kerrostettuja sinimuotoisia jännitesignaaleja, joiden taajuus on 110–3000 Hz. Sähköverkon kantoaaltosignaalit ovat sinimuotoisia jännitesignaaleja, joiden taajuus on 3–148,5 kHz. Merkinantosignaalit ovat lyhytaikaisia muutoksia eli transienteja valituissa kohdissa jänniteaaltoa. [2, s. 12] Signaalijännitteitä voidaan käyttää esimerkiksi tariffien ja kytkentätilanteiden ohjaukseen sekä erilaisten verkon komponenttien ohjaukseen [18, s. 15]. Signaalijännitteet saattavat häiritä esimerkiksi radiolähtettäviä ja tiedonkäsittelylaitteita [4, s. 4].

3 Harmoniset yliaallot

3.1 Määritelmä

Käsite harmoniset yliaallot on alun perin lähtöisin akustiikasta, jossa se tarkoittaa jousien tai ilmapatsaiden värähtelyä taajuudella, joka on perustaajuuden kerrannainen [22, s. 2]. Jousien ja ilmapatsaiden synnyttämät ääniaallot ovat ilmanpaineen vaihtelusta johtuvia mekaanisia aaltoja, jotka kulkevat väliaineen läpi jaksollisina ajan funktioina. Näin ollen voimme käyttää samaa lähestymistapaa myös muihin ajan funktioihin. [13, s. 71]

Harmoniset yliaallot määritellään jaksollisen aaltomuodon sinimuotoisiksi komponenteiksi, joiden taajuus on aaltomuodon perusaallon taajuus kokonaisluvulla kerrottuna [22, s. 2]. Näin ollen harmonisten yliaaltojännitteiden ja -virtojen taajuus voidaan esittää seuraavasti

$$f_h = hf_1 \quad , \quad (3)$$

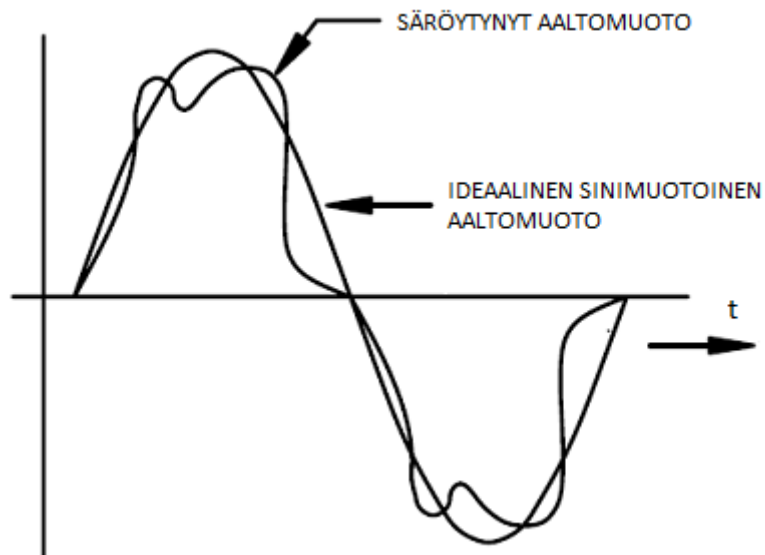
missä

f_h on harmonisen yliaallon taajuus

$h = 1, 2, 3, \dots, \infty$ on yliaallon järjestysluku

f_1 on perusaallon taajuus.

Sähkön laadun ideaalitalanteessa energialähteen tulisi syöttää jokaiselle kuormalleen virheettömän sinimuotoista jännitettä. Tämä ei kuitenkaan ole aina mahdollista useista syistä johtuen. Jännitteiden ja virtojen aaltomuotojen poikkeavuutta sinimuotoisesta kutsutaan aaltomuodon säröksi, jonka yksi ilmenemismuoto on harmoniset yliaallot. [22, s. 1] Kuvassa 13 on esitetty ideaalinen sinimuotoinen aaltomuoto ja säröytynyt aaltomuoto.



Kuva 13. Ideaalinen sinimuotoinen aaltomuoto ja säröytynyt aaltomuoto [13, s. 4, muokattu].

3.2 Fourier-sarja

Säröytyneitä jännitteitä ja virtoja, jotka ilmenevät harmonisten yliaaltojen muodossa, voidaan käsitellä jaksollisesti vaihtelevina suureina [5, s. 26], koska ne noudattavat jaksollisuuden määritelmää. Jaksollisuuden määritelmän mukaan funktio $F(t)$ on jaksollinen, mikäli

$$F(t) = F(t + T) \quad , \quad (4)$$

missä

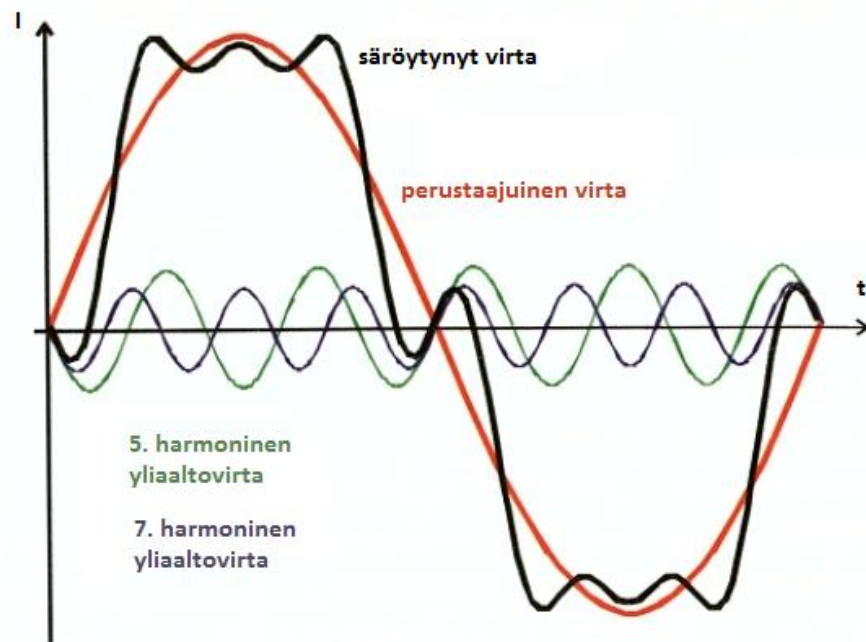
t on aika

T on jaksonaika.

Ranskalainen matemaatikko ja fyysikko Jean Baptiste Fourier (1768–1830) esitti vuonna 1822 teoksessaan ”Analyttinen lämpöteoria”, että mikä tahansa jaksollinen aaltomuoto voidaan esittää äärettömänä summana eritaajuisia sini- ja kosinimuotoisia komponentteja. Näin ollen myös säröytyneet jännitteiden ja virtojen aaltomuodot voidaan esittää sini- ja kosinimuotoisten komponenttien summana. Komponentteja, joiden taajuudet ovat perusaallon taajuuden kerrannaisia, kutsutaan harmonisiksi yliaalloiksi. [5, s. 26; 23, s. 6; 24]

Sini- ja kosinimuotoisten komponenttien summaa kutsutaan Fourier-sarjaksi keksijänsä mukaan. Sarjan avulla voidaan säröytynyt jännitteen tai virran aaltomuoto jakaa harmonisiin yliaaltokomponentteihin ja näin määrittää yksittäisen yliaaltokomponentin vaikutus kuormaan. Yliaaltokomponenttien kokonaisvaikutus kuormaan saadaan laskemalla kaikkien yliaaltokomponenttien vaikutukset yhteen. [13, s. 71–73] Kuvassa

14 on esitetty esimerkkinä perustaajuinen virta, 5. ja 7. harmoninen yliaaltovirta sekä näiden komponenttien yhteisvaikutuksesta syntynyt säröytynyt virta.



Kuva 14. Perustaajuinen virta, 5. ja 7. harmoninen yliaaltovirta sekä näiden komponenttien yhteisvaikutuksesta syntynyt säröytynyt virta [5, s. 28].

Jaksollinen epäsinimuotoinen funktio $F(t)$ voidaan esittää Fourier-sarjan avulla seuraavasti

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} (a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)) \quad , \quad (5)$$

missä

a_0 , a_h ja b_h ovat Fourier-sarjan kertoimia
 h on yliaallon järjestysluku
 ω_0 on perustaajuuden komponentin kulmanopeus
 t on aika.

Perustaajuuden komponentin eli ensimmäisen harmonisen yliaallon kulmanopeus on ω_0 , toisen harmonisen yliaallon kulmanopeus on $2\omega_0$, kolmannen harmonisen yliaallon kulmanopeus on $3\omega_0$ ja h :nen harmonisen yliaallon kulmanopeus on $h\omega_0$. [13, s. 71–72]

Fourier-sarjan kertoimet saadaan laskettua seuraavista yhtälöistä

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) dt \quad (6)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) \cos(h\omega_0 t) dt \quad (7)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) \sin(h\omega_0 t) dt \quad , \quad (8)$$

missä

T on jaksonaika
 $F(t)$ on jaksollinen epäsinimuotoinen funktio
 h on yliaallon järjestysluku
 ω_0 on perustaajuisen komponentin kulmanopeus
 t on aika.

Yhtälön (5) esitysmuodossa sini- tai kosinikomponentti voi kadota antaen Fourier-sarjalle yksinkertaisemman muodon, riippuen siitä onko funktio $F(t)$ parillinen vai pariton. Jos funktio $F(t)$ on parillinen, eli $F(-t) = F(t)$, katoaa sinikomponentti, koska kerroin b_h saa tällöin arvon 0. Jos funktio $F(t)$ on pariton, eli $F(-t) = -F(t)$, katoaa kosinikomponentti, koska kerroin a_h saa tällöin arvon 0. [13, s. 74]

Täten parillisen funktion $F(t)$ tapauksessa funktion Fourier-sarja voidaan esittää seuraavassa muodossa

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(\omega_0 t) + a_2 \cos(2\omega_0 t) + a_3 \cos(3\omega_0 t) + \dots + a_h \cos(h\omega_0 t) \quad , \quad (9)$$

missä

$a_0/2$ on tasakomponentti
 a_1 on perustaajuisen komponentin amplitudi
 ω_0 on perustaajuisen komponentin kulmanopeus
 t on aika
 a_2, a_3, \dots, a_h ovat peräkkäisten harmonisten yliaaltokomponenttien amplitudit
 h on yliaallon järjestysluku.

Parittoman funktion $F(t)$ tapauksessa funktion Fourier-sarja voidaan esittää seuraavassa muodossa

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + b_1 \sin(\omega_0 t) + b_2 \sin(2\omega_0 t) + b_3 \sin(3\omega_0 t) + \dots + b_h \sin(h\omega_0 t) \quad , \quad (10)$$

missä

$a_0/2$ on tasakomponentti
 b_1 on perustaajuisen komponentin amplitudi
 ω_0 on perustaajuisen komponentin kulmanopeus
 t on aika
 b_2, b_3, \dots, b_h ovat peräkkäisten harmonisten yliaaltokomponenttien amplitudit
 h on yliaallon järjestysluku.

Yhtälön (5) jaksollinen epäsinimuotoinen funktio $F(t)$ voidaan esittää Fourier-sarjan avulla vielä yksinkertaisemmin seuraavasti

$$F(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(h\omega_0 t + \varphi_h) \quad , \quad (11)$$

missä

c_0 on tasakomponentti
 h on yliaallon järjestysluku
 c_h on harmonisen yliaaltokomponentin amplitudi
 ω_0 on perustaajuisen komponentin kulmanopeus
 t on aika
 φ_h on harmonisen yliaaltokomponentin vaihekulma.

Tasakomponentti c_0 , amplitudi c_h ja vaihekulma φ_h lasketaan seuraavien yhtälöiden avulla

$$c_0 = \frac{a_0}{2} \quad (12)$$

$$c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (13)$$

$$\varphi_h = \tan^{-1} \left(\frac{a_h}{b_h} \right) \quad , \quad (14)$$

missä

a_0, a_h ja b_h ovat Fourier-sarjan kertoimia
 h on yliaallon järjestysluku.

Fourier-sarjan avulla voidaan siis approksimoida mikä tahansa jaksollinen epäsinimuotoinen aaltomuoto ja esittää se tasakomponentin, perustaajuisen komponentin ja harmonisten yliaaltokomponenttien avulla. Approksimaatio saadaan aikaiseksi laskemalla Fourier-sarjalle kertoimet ja summaamalla näillä kertoimilla painotettuja harmonisia sini- ja kosinikomponentteja riittävä määrä. Mitä enemmän sarjakehitelmän komponentteja otetaan summaan mukaan, sitä paremmin kehitelmä vastaa kohteena olevaa aaltomuotoa. [5, s. 26 ja 23, s. 7]

3.3 Tunnusluvut

3.3.1 Harmoninen yksittäissärö

Harmonisia yliaaltoja voidaan arvioida yksittäin harmonisen yksittäissärön eli IHD_h :n (Individual Harmonic Distortion) avulla. Harmoninen yksittäissärö ilmaisee yksittäisen yliaaltokomponentin voimakkuuden suhteessa perustaajuisen aallon voimakkuuteen eli sitä, kuinka paljon kukin yksittäinen yliaaltokomponentti vaikuttaa osaltaan aaltomuodon säröön. Harmoninen yksittäissärö voidaan laskea harmonisen yliaaltokomponentin amplitudin suhteella perustaajuiseen komponentin amplitudiin

$$IHD_h = \frac{c_h}{c_1} \quad , \quad (15)$$

missä

c_h on harmonisen yliaaltokomponentin amplitudi

c_1 on perustaajuisen komponentin amplitudi

h on yliaallon järjestysluku. [13, s. 81–83 ja 22, s. 10]

Harmonisten yliaaltojännitteiden tapauksessa yhtälön (15) harmoniselle yksittäissärölle saadaan seuraava muoto

$$IHD_h = \frac{U_h}{U_1} \quad , \quad (16)$$

missä

U_h jännitteen h :nnen harmonisen yliaaltokomponentin amplitudi

U_1 on jännitteen perustaajuisen komponentin amplitudi

h on yliaallon järjestysluku.

Vastaavasti harmonisten yliaaltovirtojen tapauksessa yhtälölle (15) saadaan seuraava muoto

$$IHD_h = \frac{I_h}{I_1} \quad , \quad (17)$$

missä

I_h virran h :nnen harmonisen yliaaltokomponentin amplitudi

I_1 on virran perustaajuisen komponentin amplitudi

h on yliaallon järjestysluku.

Harmoninen yksittäissärö voidaan laskea myös harmonisen yliaaltokomponentin tehollisarvon suhteella perustaajuisen komponentin tehollisarvoon

$$IHD_h = \frac{c_{h,rms}}{c_{1,rms}} \left(= \frac{c_h/\sqrt{2}}{c_1/\sqrt{2}} = \frac{c_h}{c_1} \right) , \quad (18)$$

missä

$c_{h,rms}$ on harmonisen yliaaltokomponentin amplitudin tehollisarvo

$c_{1,rms}$ on perustaajuisen komponentin amplitudin tehollisarvo

h on yliaallon järjestysluku. [13, s. 81 ja 22, s. 10]

3.3.2 Harmoninen kokonaissärö

Harmonisia yliaaltoja voidaan arvioida myös yhdessä harmonisen kokonaissärön eli THD:n (Total Harmonic Distortion) avulla. Harmoninen kokonaissärö ilmaisee puhtaaseen siniaaltoon syntyneiden harmonisten kerrannaisten voimakkuutta suhteessa perustaajuisen aallon voimakkuuteen eli sitä, kuinka paljon kaikki harmoniset yliaaltokomponentit yhdessä vaikuttavat aaltomuodon säröön. Puhtaan siniaallon harmoninen kokonaissärö on näin ollen nolla. THD lasketaan seuraavasti

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} IHD_h^2} , \quad (19)$$

missä

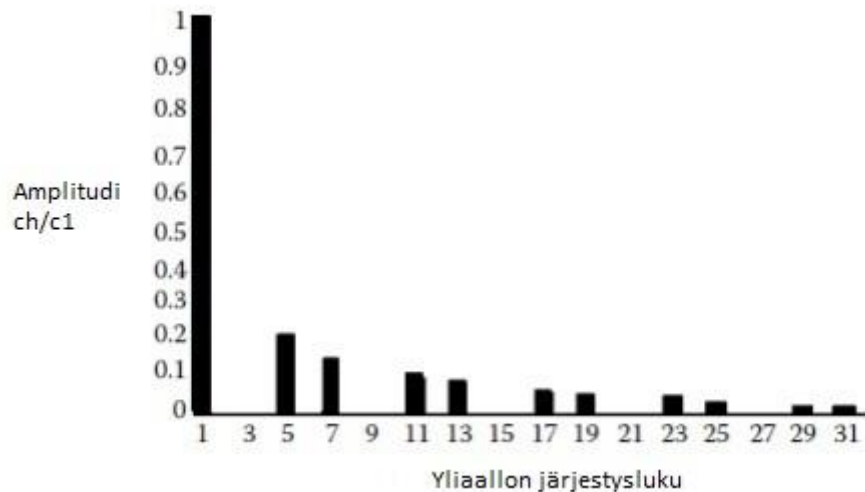
IHD_h on h:nneen yliaaltokomponentin harmoninen yksittäissärö

h on yliaallon järjestysluku. [2, s. 10 ja 13, s. 83]

3.4 Spektri

Fourier-sarjan komponenttien avulla voidaan luoda jaksollisen epäsinimuotoisen funktion $F(t)$ harmonisten yliaaltojen spektri. Jaksollisen epäsinimuotoisen funktion spektrin komponentit esiintyvät vain perusaallon taajuuksien kerrannaisina. Tällaista spektriä kutsutaan diskreetti- eli viivaspektriiksi. [6, s. 4]

Spektriesityksessä harmonisten yliaaltojen yksittäissäröt esitetään harmonisten järjestyslukujen funktiona kuvan 15 mukaisesti. Kuvan 15 spektriesityksessä on esitetty vain parittomien harmonisten yliaaltokomponenttien yksittäissäröt.



Kuva 15. Harmonisten yliaaltojen spektriesitys [22, s. 10, muokattu].

3.5 Yliaaltojen lähteet

3.5.1 Yleistä

Harmoniset yliaallot syntyvät epälineaaristen kuormien kytkemisestä sähköverkkoon. Epälineaarinen kuorma on sähkökuorma, jonka verkosta ottama tai verkkoon syöttämä virta ei ole verrannollinen kuormaan syötettyyn jännitteeseen, koska epälineaarisen kuorman impedanssi ei ole vakio. Näin ollen kun epälineaariseen kuormaan syötetään sinimuotoista jännitettä, epälineaarisen kuorman virran aaltomuoto ei ole sinimuotoinen, vaan säröytynyt. Sen sijaan syötettäessä sinimuotoista jännitettä lineaariseen kuormaan, on lineaarisen kuorman virran aaltomuoto sinimuotoinen, koska lineaarisen kuorman impedanssi on vakio. [3, s. 32–33; 5, s. 26; 13, s. 6; 14, s. 2]

Kulkiessaan verkon läpi virta, jolla on säröytynyt aaltomuoto, aiheuttaa verkon impedansseissa jännitehäviöitä, jolloin myös syöttöjännitteen aaltomuoto säröytyy. Säröytynyt syöttöjännite aiheuttaa puolestaan virtojen säröytymistä myös lineaarisissa kuormissa. [3, s. 33 ja 5, s. 26]

Erilaiset epälineaariset kuormat synnyttävät erilaisia, mutta tunnistettavia harmonisten yliaaltojen spektrejä. Täten sähköverkon eri osapuolet ovat oppineet tunnistamaan mistä harmonisten yliaaltojen lähteestä kukin harmonisten yliaaltojen spektri on aiheutunut. Tämä harmonisten yliaaltojen lähteiden tunnistus auttaa rajoittamaan ja eliminoimaan harmoniset yliaallot juuri sieltä mistä ne ovat peräisin. [22, s. 27]

3.5.2 Lähteet

Ensimmäiset harmoniset yliaallot havaittiin teollisuuden laitteissa ja prosesseissa. Teollisuudessa harmonisia yliaaltoja aiheuttavat magneettisilla rautasydämillä varustetut epälineaariset kuormat, kuten pyörivät sähkökoneet ja muuntajat. Näiden magneettisilla rautasydämillä varustettujen kuormien epälineaarisuus johtuu raudan magneettisesta kyllästymisestä. Myös valokaariuunit ovat merkittävä harmonisten yliaaltojen lähde teollisuudessa. [22, s. 28–35]

Nykyään sähköjakeluverkoissa on yleisesti käytössä paljon sellaisia laitteita, joiden parametrit, kuten jännite ja taajuus, eivät vastaa sähköjakeluverkon ominaisparametreja. Tällaisten laitteiden käytön yhteydessä on käytettävä suuntaajia, joiden tehtävänä on muuntaa parametrit tarvittuun muotoon. [22, s. 39]

Suuntaajat ovat tehoelektroniikan peruskytkeviä ja niitä on olemassa neljä erilaista [25]:

- tasasuuntaaja muuntaa vaihtosähkön tasasähköksi;
- vaihtosuuntaaja muuntaa tasasähkön vaihtosähköksi;
- tasasähkökatkoja nostaa tai laskee tasasähkön jännitettä;
- taajuusmuuttaja muuttaa vaihtosähkön taajuutta.

Suuntaajilla on paljon hyviä ominaisuuksia, kuten korkea hyötysuhde, niissä ei ole kuluvia osia ja niiden säätö on tarkkaa. Suuntaajat synnyttävät kuitenkin sähköverkkoon harmonisia yliaaltoja, koska niiden verkosta ottama virta poikkeaa sinimuotoisesta eli ne ovat myös epälineaarisia kuormia. [6, s. 9 ja 25]

Suuntaajia löytyy useista toimisto-, julkis- ja asuinrakennusten laitteista, kuten purkaus- ja loistelampuista, UPS- eli varavoimalaitteista sekä erilaisista elektroniikkalaitteista, kuten tietokoneista ja televisioista. Näiden lisäksi suuntaajia löytyy myös teollisuuden laitteista, kuten moottorien pyörimisnopeuden säätölaitteista. Esimerkiksi purkaus- ja loistelampuissa virranrajoittimina toimivat elektroniset liitäntälaitteet, jotka koostuvat jännitettä nostavasta katkojasta sekä vaihtosuuntaajasta. Tietokoneessa sen sijaan on tasasuuntaaja, sillä tietokoneen ja sen oheislaitteiden sisäiset piirit toimivat tasasähköllä. [6, s. 20; 14, s. 71; 22, s. 28–35; 25]

Edellä esiteltyjen laitteiden määrän jatkuva kasvu sähköjakeluverkoissa ja suuntaajien hyvät ominaisuudet ovat aiheuttaneet sen, että suuntaajat ovat muodostuneet yleisimmiksi harmonisten yliaaltojen lähteiksi sähköjakeluverkoissa. [6, s. 9 ja 22, s. 39]

3.6 Yliaaltojen haitat

Kiinnostus harmonisia yliaaltoja kohtaan syntyy niiden sähköverkon laitteille aiheuttamien haitallisten vaikutusten takia. Harmoniset yliaallot ovat salakavalia siitä syystä, että niiden vaikutukset havaitaan vasta sitten kun häiriö on jo tapahtunut. Tästä syystä harmonisten yliaaltojen kulkeutuminen sähköverkkoon ja niiden vaikutukset sähköverkkoon laitteisiin on tärkeää tuntea häiriöiden ehkäisemiseksi. [13, s. 90–91] Harmoniset yliaallot aiheuttavat muun muassa häviöiden kasvua sähköverkossa ja sähköverkon käyttäjien laitteissa sekä laitteiden ylikuormittumista. [5, s. 30]

3.6.1 Muuntajat

Muuntajissa harmoniset yliaallot aiheuttavat ylikuormittumista kahdella tavalla. Jännitteen säröytyminen aiheuttaa muuntajan rautasydämessä tyhjäkäyntihäviöitä, joiden vaikutus ei kuitenkaan ole kovin merkittävä. Virran säröytyminen sen sijaan aiheuttaa muuntajan käämityksissä kuormitushäviöitä, joiden vaikutukset ovat jo sen verran merkittävät, että ne on syytä ottaa huomioon muuntajan valinnassa.

Kuormitushäviöt nimittäin aiheuttavat lämpenemistä, jolla on puolestaan vaikutusta muuntajan eristyksen elinikään.[5, s. 34; 13, s. 92; 22, s. 70]

3.6.2 Moottorit

Moottoreissa harmoniset yliaallot aiheuttavat myös ylikuormittumista. Ylikuormittuminen aiheutuu harmonisten yliaaltojen aiheuttamista magneettikentistä. Erilaiset yliaallot aiheuttavat moottorin eri suuntaan pyörittäviä magneettikenttiä. Jos magneettikentän pyörimissuunta on eteenpäin eli sama kuin perustaajuudella, syntyy lisälämpenemistä ja jos magneettikentän pyörimissuunta on taaksepäin eli magneettikenttä jarruttaa moottoria, aiheutuu lisähäviöitä. Jos taas magneettikenttä on niin kutsuttu nolla- eli tasakenttä, summautuvat yliaallot nollajohtimeen kuormittaen sitä. Ylikuormittumien lisäksi harmoniset yliaallot aiheuttavat moottoreissa myös eritaajuisia momentteja sekä ääni- ja värähtelyilmiöitä. [5, s. 34–35]

3.6.3 Kondensaattoriparistot

Harmoniset yliaallot aiheuttavat kondensaattoriparistoissa ylikuormittumista. Vaikka kondensaattoriparistot on suunniteltu toimimaan maksimijännitteellä, joka voi olla jopa 110 % niiden nimellisjännitteestä, voivat harmoniset yliaallot helposti ylittää tämän maksimijännitteen ja aiheuttaa kondensaattoriparistoissa ylikuormittumista ja tämän seurauksena eliniän lyhenemistä. [13, s. 95 ja 22, s. 70–71]

Harmoniset yliaallot voivat myös synnyttää kondensaattoriparistoihin yliaaltorezonanssin, joka aiheuttaa huomattavaa vahinkoa kondensaattoriparistolle sekä muille sähköverkon laitteille. Yliaaltorezonanssi tarkoittaa yliaaltolähteen synnyttämien yliaaltojen vahvistumista jossain verkon osassa, kuten tässä tapauksessa kondensaattoriparistossa, johtuen sähköverkon impedanssien sijainnista. [5, s. 35 ja 13, s. 95] Edellisten lisäksi harmoniset yliaallot voivat aiheuttaa kondensaattoriparistojen sulakkeiden viallista toimintaa [22, s. 72].

3.6.4 Kaapelit ja johtimet

Sähkönjakelujärjestelmien kaapeleissa virran kulku aiheuttaa häviöitä. Mikäli kaapeleissa kulkee tavallisen virran lisäksi myös yliaaltovirtoja, aiheutuu tästä kaapeleihin lisähäviöitä. [13, s. 99]

Perustaajuisella symmetrisellä kolmivaihekuormalla kaapeleiden nollajohdin ei kuormitu ollenkaan. Sen sijaan harmoniset yliaallot kuormittavat nollajohdinta siten, että kolmella jaottomat harmoniset yliaallot kuormittavat nollajohdinta saman verran kuin virran perusaalto, ja kolmella jaolliset yliaallot kuormittavat nollajohdinta jopa vaihejohtimia suuremmalla virralla, sillä vaihejohtimien virrat summautuvat nollajohtimessa yhteen. Koska nollajohtimen poikkipinta-alaksi sallitaan yleensä vain puolet vaihejohtimen poikkipinta-alasta ja koska nollajohdin ei ole suojattu sulakkeilla, voivat harmoniset yliaallot nollajohtimessa aiheuttaa helposti tulipalovaaran. [5, s. 32]

3.6.5 Mittaus- ja suojalaitteet

Myös mittaus- ja suojalaitteet ovat alttiita harmonisille yliaalloille. Harmoniset yliaallot aiheuttavat esimerkiksi energianlaskutusmittareissa pätöteho-, loisteho- ja energialukemien muutoksia. Energianlaskutusmittareiden pätöteholukemien muutokset

ovat kuitenkin hyvin pieniä. Suojalaitteissa, kuten sulakkeissa ja ylikuormitussuojissa, harmoniset yliaallot aiheuttavat virhetoimintoja, kuten virheellisiä tai puuttuvia laukaisuja. Näiden mittaus- ja suojalaitteiden toimintahäiriöiden syynä ovat usein sähköverkon käyttäjien omien laitteiden synnyttämät yliaaltovirrat ja muut häiriöt. [5, s. 30–31; 13, s. 102; 14, s. 44]

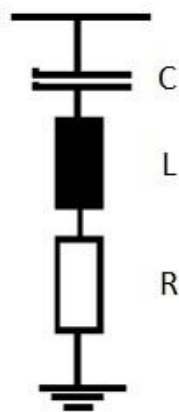
3.7 Yliaaltojen suodatus

Harmoniset yliaallot kulkeutuvat helposti niitä synnyttävistä lähteistä sähköverkkoa pitkin muihin laitteisiin ja takaisin. Niin kauan kuin harmonisten yliaaltojen lähteet ovat kytkettynä sähköverkkoon, on niiden kanssa opittava tulemaan toimeen. Tähän tarkoitukseen käytetään harmonisia yliaaltojen suodattimia, jotka jaetaan passiivisiin ja aktiivisiin suodattimiin. [13, s. 107]

3.7.1 Passiiviset suodattimet

Passiiviset suodattimet käyttävät passiivisia komponentteja, kuten resistansseja, kuristimia ja kondensaattoreita, suodattaakseen harmonisia yliaaltoja ennalta määrättyltä taajuudelta. Suodattimessa passiivisten komponenttien yhdistelmä on viritetty samalle taajuudelle kuin harmoninen yliaalto, joka on tarkoitus suodattaa. Suodatuksen lisäksi passiivisten suodattimien kondensaattorit tuottavat myös loistehoa tehokertoimen korjaamiseksi. [13, s. 107 ja 14, s. 82]

Tyypillinen passiivinen yliaaltosuodatin koostuu sarjaan kytketyistä kuristimesta ja kondensaattorista. Kuristimen ja kondensaattorin arvot valitaan siten, että ne muodostavat tietyllä yliaaltotaajuudella hyvin pieni-impedanssisen sarjaresonanssipiirin, jolloin suurin osa tällä taajuudella syntyvistä yliaalloista kulkeutuu suodattimeen. Mikäli halutaan suodattaa myös muita yliaaltoja, on kytkettävä edellisen sarjaresonanssipiirin rinnalle lisää samanlaisia sarjaresonanssipiirejä, jotka on viritetty eri yliaaltotaajuuksille. Useampia sarjaresonanssipiirejä sisältäviä suodattimia käytetään esimerkiksi valokaariuunissa, koska ne synnyttävät suuren määrän harmonisia yliaaltoja eri taajuuksilla. Tavallisesti yliaaltosuodatin koostuu kolmesta sarjaresonanssipiiristä, jotka on viritetty yleisimmille yliaaltotaajuuksille, esimerkiksi 5., 7. ja 11. yliaallon taajuuksille. [5, s. 55 ja 13, s. 107] Kuvassa 16 on esitetty yhdelle yliaaltotaajuudelle viritetty passiivinen yliaaltosuodatin.



Kuva 16. Yhdelle yliaaltotaajuudelle viritetty passiivinen yliaaltosuodatin [6, s. 32, muokattu].

Passiivisten yliaaltosuodattimien käyttö vaatii huolellista harkintaa, sillä yliaaltosuodattimet voivat muodostaa rinnakkaisen resonanssipiirin teholähteen tai kuorman impedanssin kanssa. Tällöin tilanne saattaa muuttua huonommaksi kuin mitä se oli ennen yliaaltojen suodatusta. Tämän ongelman ratkaisemiseksi voidaan passiivinen yliaaltosuodatin suunnitella siten, että sen taajuus poikkeaa jonkin verran suodattavan yliaallon taajuudesta. Tällöin vältetään rinnakkaiselta resonanssilta teholähteen tai muiden kuormien kanssa, mutta suodatus säilyy silti tehokkaana. [13, s. 107–108]

3.7.2 Aktiiviset suodattimet

Aktiiviset suodattimet ovat puolijohdetekniikalla toteutettuja yliaaltosuodattimia, jotka passiivisista suodattimista poiketen voivat vastata verkon yliaaltotilanteen muutokseen. Aktiivisten yliaaltosuodattimien toiminta perustuu siihen, että ne mittaavat sähköverkon virran yliaaltokomponentit ja tuottavat niiden kanssa 180 asteen vaihesiirrossa olevan virran, joka kumoaa alkuperäisen yliaaltovirran. Aktiivinen suodatin on siis ohjattu virtalähde. [5, s. 62]

Aktiivisten suodattimien etuja verrattuna passiivisiin suodattimiin, reaaliaikaisen reagoinnin lisäksi, ovat mahdollisuus valita useampia suodattavia taajuuksia, rinnakkaisresonanssin välttäminen sekä pienempi tilantarve. Aktiiviset suodattimet ovat kuitenkin vielä melko kalliita ja niiden häviöt ovat suuria verrattuna passiivisiin suodattimiin. [5, s. 62 ja 13, s. 108]

4 Uudet energiatehokkaat teknologiat

4.1 Aurinkosähköjärjestelmä

Aurinkosähköjärjestelmä tuottaa sähköenergiaa auringon säteilyenergian avulla. Näin ollen se on yksi uusiutuvien energialähteiden hyödyntäjistä. Aurinkosähköjärjestelmiä käytetään sähköenergian tuottamiseen joko autonomisina järjestelminä sellaisilla alueilla, joilla ei ole käytössä sähköverkkoa ollenkaan tai verkkoon kytkettyinä järjestelminä sellaisilla alueilla, joilla sähköverkko on olemassa. Aurinkosähköjärjestelmien tehot riippuvat järjestelmään asennettujen aurinkopaneelien määrästä. Yhden aurinkopaneelin maksimiteho vaihtelee noin 10 ja 200 watin välillä. [26]

4.1.1 Toimintaperiaate

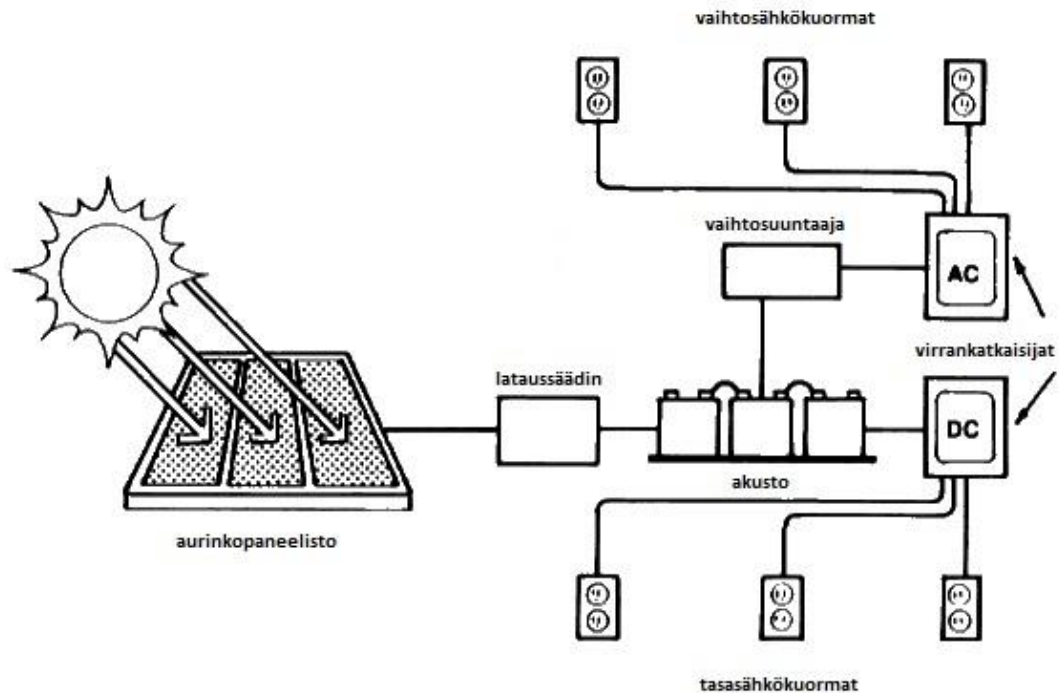
Aurinkosähköjärjestelmän toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön. Valosähköisessä ilmiössä auringonvalon osuessa valolle herkkään puolijohteeseen, elektronit puolijohteiden sisällä absorboivat auringonvalon energian, virittyvät ja liikkuvat. [27, s. 12] Elektronien liike puolijohteissa tapahtuu kahden puolijohdekerroksen välillä. Toinen puolijohdekerroksista on n-tyypin kerros, jossa on ylimääräisiä elektroneja ja jolla on negatiivinen varaus ja toinen puolijohdekerroksista on p-tyypin kerros, jossa on ylimääräisiä aukkoja ja jolla on positiivinen varaus. Auringonvalon osuessa puolijohteeseen n-tyypin kerroksen elektronit liikkuvat kohti p-tyypin kerrosta ja p-tyypin kerroksen aukot liikkuvat kohti n-tyypin kerrosta. Elektronien ja aukkojen liike synnyttää puolijohdekerrosten välille sähkökentän. [28] Näin ollen valolle herkat puolijohteet muuntavat absorboimansa auringonvalon säteilyenergian sähköenergiaksi. Aurinkokennot, joista aurinkosähköjärjestelmän aurinkopaneelit koostuvat, ovat ohuita, litteitä levyjä, jotka on valmistettu edellä kuvatuista valolle herkistä puolijohteista, yleisemmin piistä. [27, s. 12] Muita puolijohteita, joista aurinkokennoja valmistetaan, ovat muun muassa galliumarsenidi (GaAs) ja kadmiumtelluridi (CdTe).

4.1.2 Komponentit

Aurinkosähköjärjestelmän keskeisin komponentti on aurinkopaneelisto. Aurinkopaneelisto muodostuu sarjaan ja rinnan kytketyistä aurinkopaneeleista, jotka puolestaan muodostuvat sarjaan ja rinnan kytketyistä aurinkokennoista. Sarjaan kytkentä kasvattaa jännitteen ja rinnan kytkentä kasvattaa virran suuruutta. [27, s. 15; 29, s. 126; 30, s. 164]

Mikäli aurinkosähköjärjestelmältä vaaditaan energian varastointia, liitetään järjestelmään akusto aurinkopaneeliston ja kuorman väliin [27, s. 16 ja 29, s. 128]. Akusto muodostuu akuista, joita voidaan kytkeä sarjaan jännitteen kasvattamiseksi ja rinnan varauksapasiteetin kasvattamiseksi. Energian varastoinnin lisäksi akusto tasaa jännitevaihteluja ja mahdollistaa suurien hetkellisten kuormatehojen syöttämisen. Jottei akusto ylilatautuisi, on aurinkopaneeliston ja akuston väliin kytkettävä vielä lataussäädin, joka ohjaa akuston latausta. Lataussäädin vastaanottaa aurinkopaneelin tuottaman tehon ja valvoo tehon siirtymistä akustoon pienentämällä lataustehoa tai lopettamalla latauksen kokonaan kun akusto on täysi. Näin lataussäädin suojaa akustoa vahingoittumiselta, mikä johtuisi ylilatautumisesta. [29, s. 132]

Vaihtosuuntaajaa tarvitaan sellaisissa aurinkosähköjärjestelmissä, jotka on kytketty sähköverkkoon tai joiden kuorma toimii vaihtosähköllä. Tällöin vaihtosuuntaaja kytketään aurinkopaneeliston ja kuorman väliin tai akuston ja kuorman väliin, jossa se muuntaa aurinkopaneeliston tuottaman tasavirran vaihtovirraksi. [29, s. 133]. Edellisten komponenttien lisäksi aurinkosähköjärjestelmä koostuu myös virrankatkaisijoista, sulakkeista, kaapeleista ja mittareista. Kuvassa 17 on esitetty akuston kanssa toimiva autonominen aurinkosähköjärjestelmä.



Kuva 17. Akuston kanssa toimiva autonominen aurinkosähköjärjestelmä [31, muokattu].

4.1.3 Järjestelmien tyypit

Aurinkosähköjärjestelmät voidaan jakaa autonomisiin ja sähköverkkoon kytkettyihin järjestelmiin. Autonomiset järjestelmät voidaan edelleen jakaa ilman akustoa toimiviin, akuston kanssa toimiviin ja hybridiaurinkosähköjärjestelmiin. Ilman akustoa toimivat aurinkosähköjärjestelmät sopivat kuormille, jotka eivät tarvitse energian varastointia. Tällaisia ovat esimerkiksi kuormat, joille toiminta-aika ei ole kriittinen tai joilla toiminta-aika täsmää auringon säteilyn saatavuuden kanssa. Esimerkiksi tuuletus on tarpeellinen ainoastaan päivällä auringon paistaessa. Myös kuormat, joilla on järjestelmän sisäinen energian varastointi, eivät tarvitse akustoa aurinkosähköjärjestelmissään. Esimerkkinä tällaisista kuormista ovat pumppaamot, joilla on itsenäinen veden varastointi patoaltaissa. Akuston kanssa toimivissa autonomisissa aurinkosähköjärjestelmissä aurinkopaneelisto syöttää tehoa kuormalle ja varaa akuston auringon paistaessa. Pilvisellä säällä ja öisin kuorma saa tehonsa akustosta. Autonomisessa hybridijärjestelmässä energiaa tuottaa aurinkopaneeliston lisäksi myös avustava tehonlähde. Avustava tehonlähde on yleensä dieselillä, kaasulla tai bensiinillä toimiva generaattori. Tehonlähde aloittaa toimintansa silloin kun kuorman tarvitsema teho on suurempi kuin aurinkopaneeliston tuottama teho. Tällöin avustava tehonlähde syöttää tehoa kuormalle ja lataa samalla akuston. [27, s. 17–18]

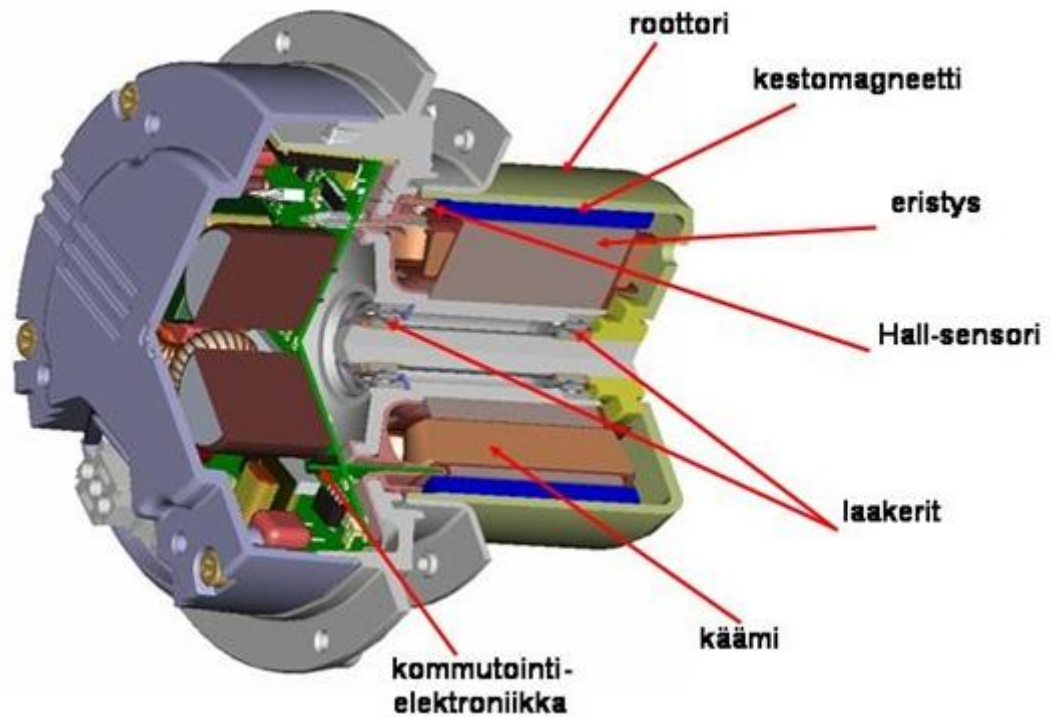
Sähköverkkoon kytketyt aurinkosähköjärjestelmät vaativat aina vaihtosuuntaajan, koska tasasähköä tuottavaa järjestelmää ei voida sellaisenaan yhdistää vaihtosähköverkkoon. Kytkeä sähköverkkoon edellyttää sopimusta sähköyhtiön kanssa ja sähköturvallisuuden varmistamista. Tällöin aurinkosähköjärjestelmässä ei tarvita akustoa, vaan aurinkopaneeliston tuottama tasavirta muutetaan vaihtosuuntaajan välityksellä vaihtovirraksi ja syötetään kiinteistön sähköverkkoon. Ylimääräinen tuotettu aurinkosähkö syötetään yleiseen sähköverkkoon. Vastaavasti yleisestä sähköverkosta otetaan sähköä silloin kun aurinkopaneeliston tuottama sähkö ei ole riittävä. [32]

4.1.4 Edut

Aurinkosähköjärjestelmän ensisijainen ja tunnetuin etu on järjestelmässä käytetyn energian uusiutuvuus. Tämän seurauksena aurinkosähköjärjestelmä on ympäristöystävällinen, sillä se ei tarvitse polttoainetta eikä se aiheuta päästöjä, melua eikä säteilyä. Koska aurinkosähköjärjestelmän rakenne on staattinen eli se ei sisällä liikkuvia osia, on sen huoltotarve vähäinen ja käyttöikä pitkä. Huoltokustannusten lisäksi myös toimintakustannukset ovat aurinkosähköjärjestelmillä alhaiset eikä siirto- ja jakelukustannuksia muodostu. Koska aurinkosähköjärjestelmä koostuu moduuleista, on suuriakin kokonaisuuksia helppo koota. Edellisten etujen lisäksi aurinkosähköjärjestelmän taloudellinen riski on pieni, sillä riippuvuutta polttoaineen hinnasta ei ole. Tulevaisuudessa aurinkosähköjärjestelmien nopea kehitys tulee laskemaan niiden valmistuskustannuksia ja parantamaan suorituskykyä, joten aurinkosähköjärjestelmiä tullaan käyttämään yhä useammin rakennusten sähköenergian tuottajina. [27, s.18–19; 30, s. 148; 33; 34]

4.2 EC-moottori

EC-moottori on elektronisesti kommutoitu (Electronically Commutated) tasavirtamoottori. EC-moottori koostuu kiinteästä staattorista, johon on kiinnitetty kiinteät käämitykset ja roottorista, jonka sisälle on kiinnitetty kestopagneetit [35]. EC-moottoreita käytetään lähinnä rakennusten ilmanvaihdossa ja ilmastoinnissa puhaltimina, mutta myös kylmäteknikan, tietoliikenteen ja lääketieteen laitteissa sekä myyntiautomaateissa. EC-moottoreiden tehot ovat yleensä muutamista sadoista wateista muutamiin kilowatteihin ilmanvaihdon ja ilmastoinnin sovelluksissa. Muissa sovelluksissa, kuten esimerkiksi kylmäteknikan sovelluksissa, moottorien tehot ovat vain muutamia kymmeniä watteja. Kuvassa 18 on esitetty EC-moottorin rakenne.



Kuva 18. EC-moottorin rakenne [36].

4.2.1 Toimintaperiaate

EC-moottorissa kommutoinnilla tarkoitetaan virran kulkusuunnan muuttumista staattorissa roottorin asennosta riippuen [37]. Staattorin eri käämeihin vuorotellen kytkettävä virta aiheuttaa staattorin virran kulkusuunnan muuttumisen, mikä puolestaan pakottaa roottorin pyörimään ja näin ollen tuottamaan vääntömomentin [38]. Perinteisissä hiiliharjallisissa tasavirtamoottoreissa kommutointi tapahtuu sähkömekaanisesti hiiliharjojen ja kommutaattorin avulla, mutta EC-moottorissa hiiliharjat ja kommutaattori on korvattu elektronisella säätimellä, jolloin kommutointi tapahtuu elektronisesti [36 ja 39]. Säädin saa tiedon roottorin asennosta suhteessa staattoriin anturien välityksellä ja ohjaa tämän tiedon avulla virtaa oikeaan käämiin oikeaan aikaan. Antureina voivat toimia esimerkiksi Hall-anturit. [36]

4.2.2 Kytkeä sähköverkkoon

Vaikka EC-moottori on tasavirtamoottori, pystytään se kuitenkin kytkemään suoraan rakennuksen sisäiseen vaihtojänniteverkkoon, sillä moottoriin integroitu elektronikka muuntaa vaihtovirran tasavirraksi tasasuuntaajan avulla [35 ja 40]. Tämän lisäksi integroitu elektronikka ohjaa moottorin pyörimisnopeutta säätämällä moottorin saamaa virtaa. Moottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää lämpötilan, ilmvirran, paineen tai minkä tahansa muun parametrin mukaan kytkemällä moottoriin sellainen sensori, joka voi antaa 0-10 V:n tai 4-20 mA:n säätöviestin. Rakennuksen sisäisen sähköverkon vaihtovirran muuntaminen sensoreiden käyttämäksi tasavirraksi on toteutettu myös käyttämällä moottorin integroitua elektronikkaa. [35]

4.2.3 Edut

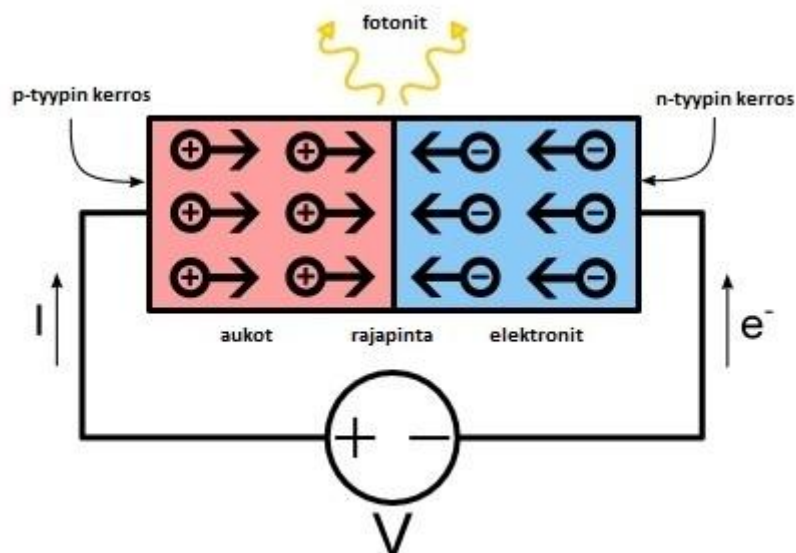
EC-moottorit ovat nousemassa perinteisten vaihtovirta- ja tasavirtamoottoreiden tilalle monien etujensa ansiosta. EC-moottoreiden roottoreissa käytetään kestopagneetteja, mistä syystä EC-moottorit ovat paljon tehokkaampia kuin perinteiset vaihtovirtamoottorit, joiden roottoreissa käytetään häviöitä aiheuttavia kuparikäämityksiä [35]. Vaihtovirtamoottoreiden hyötysuhde on korkeimmillaan vain kapealla pyörimisnopeusalueella, jonka molemmiin puoliin hyötysuhde heikentyy merkittävästi. Sen sijaan EC-moottoreiden hyötysuhde on tasainen ja korkea koko pyörimisnopeusalueella. Tästä seuraa se, että EC-moottori on paljon joustavampi, koska sama moottori pystyy vastaamaan eri sovellusten suorituskykyvaatimuksiin saavuttaen silti hyvän hyötysuhteen. Korkean hyötysuhtensa ansiosta EC-moottori ei myöskään lämpene yhtä paljon kuin alhaisemman hyötysuhteen omaavat moottorit ja näin ollen ei tarvitse niin paljon jäähdytystä, jolloin sen energiatehokkuus paranee ja elinikä pitenee. [36 ja 41]

4.3 LED

LED (Light Emitting Diode) eli loistediodi on puolijohdekomponentti, joka säteilee valoa kun sen läpi johdetaan tasasähkövirta [42]. Ensimmäisiä LEDejä käytettiin lähinnä merkivaloina erilaisissa laitteissa, kuten radioissa ja nauhureissa. Nykyään LEDejä käytetään hammaslääketieteessä sinisen värisenä kovettamaan hammaspaikoissa käytettävää hartsia, valokuvauspimiöissä punaisten hehkulamppujen tilalla sekä tuoreen ruoan valaistuksessa. [43, s. 8-9] Yhden perinteisen LEDin valoteho ei kuitenkaan riitä kunnolla valaistukseen, joten on kehitetty teholedejä, joiden antama valoteho on paljon suurempi kuin perinteisen LEDin [44]. Sisävalaistuksen lisäksi teholedejä käytetään muun muassa mainosvaloissa, liikennevaloissa, katuvalaistuksessa ja autovalaistuksessa. Edellisten lisäksi teholedejä käytetään myös tunnelmavalauksessa, näyttöjen taustavalauksessa sekä portaiden ja hätäuloskäyntien valaistuksessa. [43, s. 10–12] LEDien ottoteho vaihtelee välillä 100 mW-15 W, joista yli yhden watin LEDit ovat teholedejä. [45]

4.3.1 Toimintaperiaate

LEDin toimintaperiaate on periaatteessa sama kuin aurinkokennoilla, mutta päinvastainen – LEDeissä valoa tuotetaan, jolloin sähköä kulutetaan. [46, s. 37] LEDin toiminta perustuu pn-liitokseen, joka muodostuu p- ja n-tyypin puolijohdekerroksista sekä näiden välisestä rajapinnasta. P-tyypin kerroksessa on positiivinen varaus, koska siinä on runsaasti aukkoja eli positiivisia varauksenkuljettajia. N-tyypin kerroksessa on sen sijaan negatiivinen varaus, koska siinä on runsaasti elektroneja eli negatiivisia varauksenkuljettajia. Pn-liitos on tasapainossa kunnes siihen tuodaan ulkopuolista energiaa. LEDissä pn-liitokseen kytketään ulkoinen jännitelähde siten, että sen negatiivinen napa kytketään n-tyypin kerrokseen ja positiivinen napa vastaavasti p-tyypin kerrokseen. Tällöin rajapintavyöhyke kapenee ja n-tyypin kerroksen elektronit siirtyvät p-tyypin kerrosta kohti ja rekombinoituvat p-tyypin kerroksen aukkojen kanssa liitoskohdassa. Elektroni-aukkoparin rekombinaatiossa elektroni siirtyy alemmalle energiatasolle ja vapauttaa valokvantin eli fotonin. Tästä syntyy LEDin valoefekti. [42 ja 44] Kuvassa 19 on esitetty LEDin toimintaperiaate.



Kuva 19. LEDin toimintaperiaate [47, muokattu].

Yksittäinen LED-siru säteilee lähes monokromaattista valoa eli se on yksivärinen. LEDeillä on kuitenkin mahdollista tuottaa myös valkoista valoa joko RGB-menetelmällä, jossa valkoinen valo tuotetaan sekoittamalla yhteen kolmen tai useamman erivärisen LED-sirun tuottamaa valoa, tai päällystämällä sinistä tai ultraviolettia valoa tuottava LED-siru yhdellä tai useammalla fosforilla. [42 ja 46, s. 38–39]

4.3.2 Kytkeä sähköverkkoon

LED tuottaa valoa, kun siihen syötetään tasavirtaa. Tästä johtuen yleiseen sähköverkkoon kytkettävissä LED-valaisimissa tarvitaan tasavirtalähde valaisimeen integroituna tai erillisenä liitäntälaitteena. [46, s. 37] Tasavirtalähde sisältää tasasuuntaajan, joka muuntaa yleisen sähköverkon vaihtovirran LEDille sopivaksi tasavirraksi.

Nykyään monet valmistajat ovat tuoneet markkinoille LED-lamppuja, jotka voidaan asentaa nykyisiin valaisimiin nykyisten valonlähteiden tilalle. Esimerkiksi perinteisten loisteputkien tilalle markkinoilta löytyy korvaavia LED-valoputkia. Näissä LED-lampuissa LEDien vaatima tasavirtalähde on integroituna lampujen liitäntälaitteeseen. Koska LED-lampun valonjako ja -tuotto eivät välttämättä vastaa alkuperäisen valonlähteen valonjakoa ja -tuottoa, joihin valaisin oli suunniteltu, saattavat valaisimen valaistusominaisuudet poiketa alkuperäisestä vaihdettaessa alkuperäinen valonlähde LED-valonlähteeseen. [46, s. 39]

4.3.3 Edut

LEDien ehkä suurimpana etuna on niiden korkea valotehokkuus, joka on kehittynyt nopeasti viime vuosien aikana. Valotehokkuus kuvaa tuotetun valovirran suhdetta kulutettuun sähkötehoon. Kaupallisten LEDien valotehokkuus on tällä hetkellä parhaimmillaan noin 120 lm/W, mutta laboratorio-olosuhteissa on rikottu jo 200 lm/W:n raja. [42] Toinen LEDien etu on niiden pitkä käyttöikä, mikä tekee LEDeistä elinkaarikustannuksiltaan kilpailukykyisiä verrattuna nykyisin käytössä oleviin valonlähteisiin. LEDien käyttöäksi luvataan tällä hetkellä 30 000–50 000 tuntia, johon

mennessä valolähteen valovirta on vähintään 70 %:n tasolla alkuperäisestä valovirrasta. [46, s. 38 ja 48] LEDeillä on myös vähäinen huollon tarve ja hyvät säätömahdollisuudet. LEDien hyvien ominaisuuksien ja nopean kehityksen ansiosta tullaan niitä käyttämään tulevaisuudessa yhä enenevässä määrin valaistuksessa energiankulutuksen säästöjen saavuttamiseksi ja päästöjen vähentämiseksi. [42]

5 Standardit

5.1 SFS-EN 50160

5.1.1 Standardin esittely

Suomen standardisoimisliitto SFS on vahvistanut 22.11.2010 standardin SFS-EN 50160 ”Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet” 4. painoksen. Standardi SFS-EN 50160 on vahvistettu suomalaiseksi kansalliseksi standardiksi eurooppalaisen standardin EN 50160:2010 pohjalta.

Standardissa SFS-EN 50160 määritellään, kuvataan ja spesifioidaan jännitteen pääominaisuudet verkon käyttäjän liittymiskohdassa yleisiin pien-, keski- ja suurjännitteisiin vaihtosähköjakeluverkkoihin normaaleissa käyttöolosuhteissa. Standardissa määritellään myös rajat tai arvot, joiden sisällä kuluttaja voi olettaa liittymiskohdan jännitteen ominaisuuksien pysyvän eurooppalaisen yleisen jakeluverkon alueella. Standardin tavoitteena on täten määritellä ja esittää vaatimukset jakelujännitteen taajuudelle, suuruudelle, aaltomuodolle sekä kolmivaiheisen jännitteen symmetrisyydelle. [2, s. 6]

Standardia SFS-EN 50160 ei kuitenkaan voida soveltaa epänormaaleissa olosuhteissa. Epänormaaleja olosuhteita ovat sellaiset tilapäiset syöttöjärjestelyt, joilla sähkön käyttäjille pyritään varmistamaan sähkön syöttö, kun järjestelyn on aiheuttanut vikatilanne, verkon huolto- tai rakennustyöt tai kun pyritään minimoimaan käyttökeskeytyksen laajuus ja kesto. Epänormaaleja olosuhteita ovat myös sellaiset tapaukset, joissa verkonkäyttäjän asennukset tai laitteet eivät täytä voimassa olevia standardeja tai verkkoon liittämiseksi asetettuja teknillisiä vaatimuksia. Epänormaaleiksi olosuhteiksi luetaan myös poikkeukselliset tapaukset, kuten poikkeukselliset sääolosuhteet ja muut luonnonkatastrofit, ulkopuolisten aiheuttamat häiriöt, viranomaisten toimenpiteet, työtaistelut, ylivoimaiset esteet ja ulkopuolisista tapahtumista aiheutuva tehovajaus. [2, s. 6-12]

5.1.2 Sallitut harmoniset yliaaltojännitteet

Standardissa SFS-EN 50160 on esitetty harmonisten yliaaltojännitteiden mittaamenetelmä ja sallitut arvot verkon käyttäjän liittämiskohdassa yleiseen pienjänniteverkkoon. Standardin mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, 95 % jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin taulukossa 1 annettu arvo. Taulukossa 1 $IHD_{U_{max}}$ tarkoittaa suurinta sallittua harmonisen yliaaltojännitteen arvoa prosentteina perustaajuisesta jännitteestä. Järjestysluvultaan yli 25 harmonisille yliaalloille ei standardissa anneta raja-arvoja, koska ne ovat tavallisesti pieniä ja arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi. Tämän lisäksi jakelujännitteen harmonisen kokonaissärön eli THD:n, jonka laskemisessa on otettava huomioon kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka, tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %. [2, s. 22]

Taulukko 1. Harmonisten yliaaltojännitteiden suurimmat sallitut arvot liittämiskohdassa prosentteina perustaajuisesta jännitteestä [2, s. 22, muokattu].

| parittomat yliaallot | | parilliset yliaallot | | | |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
| järjestysluku | IHD _{Umax} (%) | järjestysluku | IHD _{Umax} (%) | järjestysluku | IHD _{Umax} (%) |
| h | | h | | h | |
| 5 | 6,0 | 3 | 5,0 | 2 | 2,0 |
| 7 | 5,0 | 9 | 1,5 | 4 | 1,0 |
| 11 | 3,5 | 15 | 0,5 | 6...24 | 0,5 |
| 13 | 3,0 | 21 | 0,5 | | |
| 17 | 2,0 | | | | |
| 19 | 1,5 | | | | |
| 23 | 1,5 | | | | |
| 25 | 1,5 | | | | |

5.2 IEC 61000-3-2

5.2.1 Standardin esittely

Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio IEC International Electrotechnical Commission on julkaissut huhtikuussa 2009 standardin ”Electromagnetic compatibility – Parts 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions” (IEC 61000-3-2) eli standardin, joka on osa sähkömagneettisen yhteensopivuuden standardikonaisuutta, ja joka asettaa raja-arvot harmonisille yliaaltovirroille.

Standardi IEC 61000-3-2 asettaa harmonisten yliaaltovirtojen raja-arvot sellaisille sähkö- ja elektroniikkalaitteille, joiden syöttövirta on 16 A tai alle yhtä vaihetta kohti ja jotka on tarkoitus yhdistää yleiseen pienjännitteeseen vaihtosähköjakeluverkkoon [49, s. 7]. Standardin esittämät raja-arvot harmonisille yliaaltovirroille on tarkoitettu yksittäisille laitteille, joten mittaukset on suoritettava laitekohtaisesti [49, s. 22–24]. Standardin vaatimukset ja raja-arvot soveltuvat laitteille, jotka on tarkoitus kytkeä 220/380 V, 230/400 V tai 240/415 V sähköjakeluverkkoon taajuudella 50 Hz tai 60 Hz [49, s. 12].

5.2.2 Sallitut harmoniset yliaaltovirrat

Standardissa IEC 61000-3-2 laitteet, joille asetetaan harmonisten yliaaltovirtojen raja-arvot, on jaettu neljään ryhmään. Ryhmään A kuuluvat symmetriset kolmivaiheiset laitteet, kodinkoneet, jotka eivät kuulu ryhmään D, kiinteät työkalut, hehkulamppujen himmentimet, äänentoistolaitteet sekä laitteet, jotka eivät kuulu muihin ryhmiin. Ryhmään B kuuluvat siirrettävät työkalut ja kaarihitsauslaitteet, jotka eivät ole ammattilaitteita. Ryhmään C kuuluvat valaistuslaitteet. Ryhmään D kuuluvat tietokoneet, tietokonenäytöt ja televisiovastaanottimet, joiden teho on pienempi tai yhtä suuri kuin 600 W. [49, s. 12]

Aurinkosähköjärjestelmä ja EC-moottori ovat symmetrisiä kolmivaiheisia laitteita, joten ne kuuluvat ryhmään A ja LED-valaisimet ovat valaistuslaitteita, joten ne kuuluvat

ryhmään C. Ryhmän A laitteille on tässä standardissa määritelty suurimmat sallitut harmoniset yliaaltovirrat ainoastaan absoluuttisesti. Tämän diplomityön yhteydessä ei kuitenkaan ole mahdollista mitata absoluuttisia harmonisten yliaaltovirtojen arvoja, joten ryhmän A laitteiden suurimpia sallittuja yliaaltovirtoja ei tässä yhteydessä esitellä. Sen sijaan ryhmän C laitteiden suurimmat sallitut harmoniset yliaaltovirrat esitellään seuraavaksi.

Ryhmän C laitteiden, joiden syöttöteho on yli 25W, kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltovirran arvo ei saa ylittää taulukossa 2 esitettyä arvoa. Taulukossa 2 IHD_{\max} tarkoittaa suurinta sallittua harmonisen yliaaltovirran arvoa prosentteina perustaajuisesta virrasta. [49, s. 19–21]

Taulukko 2. Harmonisten yliaaltovirtojen suurimmat sallitut arvot prosentteina perustaajuisesta virrasta ryhmän C laitteille [49, s. 21, muokattu].

| järjestysluku h | IHD_{\max} (%) |
|-------------------------------------|------------------|
| 2 | 2,0 |
| 3 | 30,0 * λ |
| 5 | 10,0 |
| 7 | 7,0 |
| 9 | 5,0 |
| $11 \leq h \leq 39$ (parittomat) | 3,0 |
| * λ on piirin tehokerroin | |

6 Mittaukset

6.1 Tutkimuskohteet

Diplomityön tutkimuskohteiksi on valittu Helsingin kaupungin kouluissa sijaitsevat aurinkosähköjärjestelmä, EC-moottori ja LED-valaistus. Tutkimuskohteet on valittu sen perusteella, että ne sisältävät suuntaajia, joiden on edellä todettu synnyttävän harmonisia yliaaltoja sähköverkkoon. Aurinkosähköjärjestelmässä on vaihtosuuntaaja, joka muuntaa aurinkosähköjärjestelmän tuottaman tasavirran vaihtovirraksi, sillä tutkittava aurinkosähköjärjestelmä on kytketty rakennuksen sisäiseen vaihtosähköverkkoon. EC-moottorissa on tasasuuntaaja, joka muuntaa rakennuksen sisäisen sähköverkon vaihtovirran moottorille sopivaksi tasavirraksi. LED-valonlähteet toimivat myös tasavirralla, joten ne tarvitsevat EC-moottorin tapaan tasasuuntaajan, joka muuntaa rakennuksen sisäisen sähköverkon vaihtovirran LED-valonlähteille sopivaksi tasavirraksi.

6.1.1 Aurinkosähköjärjestelmä

Diplomityön ensimmäinen tutkimuskohde, aurinkosähköjärjestelmä, sijaitsee Latokartanon peruskoulussa. Latokartanon peruskoulu on rakennettu vuonna 2009. Koulun pinta-ala on $5\,315\text{ m}^2$ ja rakennustilavuus on $27\,400\text{ m}^3$. [50] Latokartanon peruskoulussa toimii sekä ala- että yläaste ja koulussa on noin 730 käyttäjää [51 ja 52]. Latokartanon peruskoulun kiinteistö on liitetty Helsingin Energian 0,4 kV:n pienjänniteverkkoon. Kiinteistön sähköjakeluverkko on 5-johdinjärjestelmän mukainen. [53] Latokartanon peruskoulun sähköenergian kulutus vuonna 2010 oli 518 MWh ja ominaiskulutus oli $18,9\text{ kWh/m}^3$ [50].

Aurinkosähköjärjestelmä on asennettu Latokartanon peruskouluun vuonna 2009. Järjestelmä on kytketty rakennuksen sähköverkkoon vaihtosuuntaajien välityksellä, joita on kolme kappaletta, yksi kutakin vaihetta kohti. [53] Aurinkosähköjärjestelmän tuottama energia syötetään pääkeskukseen ja sieltä rakennuksen jakeluverkon välityksellä sähkökuormille, jolloin sillä korvataan osa ostoenergiasta. Järjestelmän nimellisteho on kuitenkin sen verran pieni, ettei sen tuottamaa ylimääräistä sähköenergiaa syötetä yleiseen sähköverkkoon. [54]

Aurinkosähköjärjestelmään kuuluu aurinkopaneelisto, joka koostuu 53 Naps Systems Oy:n toimittamasta aurinkopaneelisto (solar module NP 200 GK). Kunkin paneelin huipputeho on 200 W ja pinta-ala on noin $1,5\text{ m}^2$ ($1475 \times 986\text{ mm}$), joten järjestelmän kokonaishuipputeho on 10,6 kW ja kokonaispinta-ala on noin 77 m^2 . Järjestelmän aurinkopaneelit on valmistettu kytkemällä sarjaan 54 monikiteisestä piistä valmistettua aurinkokennoa. Standarditestaolosuhteissa aurinkopaneelien hyötysuhde on 13,8 %. Paneelit on asennettu koulun vesikatolle suoraan kattopintaan, jonka kaltevuus on noin $41\text{--}42^\circ$. [54 ja 55]

6.1.2 EC-moottori

Toinen diplomityön tutkimuskohde, EC-moottori, sijaitsee Pihkapuiston ala-asteen koulussa. Pihkapuiston ala-asteen koulu on rakennettu vuonna 1989 ja se sijaitsee Helsingin Malminkartanossa. Pihkapuiston ala-asteen koulun pinta-ala on $5\,132\text{ m}^2$ ja rakennustilavuus on $25\,312\text{ m}^3$. [50] Pihkapuiston ala-asteen koulussa toimii ainoastaan ala-aste ja siinä on noin 260 käyttäjää [52 ja 56]. Pihkapuiston ala-asteen koulun

kiinteistö on liitetty Helsingin Energian 0,4 kV:n pienjänniteverkkoon. Kiinteistön sähköjakeluverkko on 4-johdinjärjestelmän mukainen. [57, s. 2-10] Pihkapuiston ala-asteen koulun sähköenergian kulutus vuonna 2010 oli 245 MWh ja ominaiskulutus oli 9,7 kWh/m³ [50].

Pihkapuiston ala-asteen kouluun on asennettu vuonna 2009 kaksi Recairin puhallinta, jotka on varustettu kolmivaiheisilla EC-moottoreilla [52]. Toista puhallinta käytetään koulun liikuntatilojen ilmanvaihdon tulo- ja toista poistoilmapuhaltimena. Puhaltimien EC-moottorit on kytketty suoraan rakennuksen sähköverkkoon, sillä moottoreihin integroitu elektroniikka muuntaa rakennuksen sähköverkon vaihtovirran moottoreille sopivaksi tasavirraksi. Puhaltimet sijaitsevat koulun ilmanvaihtokonehuoneessa ja niiden sähkönsyöttö on toteutettu ilmanvaihtokonehuoneen jakokeskuksesta. Puhaltimien käyntiä ohjataan rakennusautomaation aikaohjelmalla. Käyttöaikana puhaltimien pyörimisnopeutta säädetään liikuntasalin hiilidioksidipitoisuuden ja pukuhuoneen suhteellisen kosteuden mittausrvojen perusteella. [54] Tämän diplomityön tutkimuskohteena on tulopuhaltimen EC-moottori. EC-moottorin nimellisteho on 3,0 kW ja hyötysuhde on 85 % [58].

6.1.3 LED-valaistus

Kolmas diplomityön tutkimuskohde, LED-valaistus, sijaitsee Hietakummun ala-asteen koulussa. Hietakummun ala-asteen koulu on rakennettu vuonna 1959 ja se sijaitsee Helsingin Ala-Malmilla. Hietakummun ala-asteen koulun pinta-ala on 4 512 m² ja rakennustilavuus on 16 916 m³. [50] Hietakummun ala-asteen koulussa toimii ainoastaan ala-aste ja siinä on noin 310 käyttäjää [52 ja 59]. Hietakummun ala-asteen koulun kiinteistö on liitetty Helsingin Energian 0,4 kV:n pienjänniteverkkoon. Kiinteistön sähköjakeluverkko on 4-johdinjärjestelmän mukainen. [60, s. 2-11] Hietakummun ala-asteen koulun sähköenergian kulutus vuonna 2010 oli 151 MWh ja ominaiskulutus oli 9,0 kWh/m³ [50].

Vuonna 2011 Hietakummun ala-asteen koulun yhden luokkahuoneen valaistus muutettiin LED-valaistukseksi. Ennen vaihtoa luokkahuoneen valaistus oli toteutettu 12 1x58W:n T8-loistelampulla. Vaihdoissa 12 T8-loistelamppua vaihdettiin 12 Valtavalo Oy:n 22 W:n LED-valoputkeen (ELITE G2 VV22E150G2) siten, että olemassa olevat valaisimet säilytettiin. Valtavalo Oy:n LED-valoputki koostuu 360 LED-komponentista ja se sisältää liitäntälaitteen, joka muuntaa rakennuksen sähköverkon vaihtovirran LEDille sopivaksi tasavirraksi. LED-valoputken valotehokkuudeksi luvataan 93–100 lm/W. [61] Luokkahuoneen LED-valaistuksen kokonaisteho on 264 W, sen sähkönsyöttö on yksivaiheinen ja se on toteutettu luokkahuonesiipeä palvelevasta jakokeskuksesta.

6.2 Mittauksissa käytetyt laitteet

Diplomityön mittauksissa on käytetty Fluke 435 kolmivaiheista sähkön laadun analysaattoria. Analysaattorin kuva on esitetty liitteessä 1. Fluke 435 analysaattori on vahvistettu EMC- ja LVD-direktiivien (Electromagnetic Compatibility Directive 89/336/EEC ja Low Voltage Directive 73/23/EEC) mukaiseksi laitteeksi. Tämän lisäksi analysaattorilla suoritettujen mittausten suorituskyykyksi on vahvistettu luokka A standardin IEC 61000-4-30 mukaan, sen ansiosta, että analysaattorin jännitteen mittaustarkkuus on 0,1 %. Luokan A vastaavuus tarkoittaa sitä, että kytkettäessä

analysaattori tiettyyn signaaliin se tuottaa samanlaisen signaalin. Luokan A laitteiden tulee täyttää edellä mainitun standardin korkeimmat suorituskäy- ja tarkkuusvaatimukset. [62, s. 9-17 ja 63]

Analysaattorilla voidaan suorittaa erilaisia mittauksia sähköjakelujärjestelmän tarkastamiseksi. Toiset mittauksista antavat yleisen kuvan järjestelmästä, kun taas toiset kertovat pienimmätkin yksityiskohdat. Sähkön laadun analysointilaite voidaan mitata ja tallentaa muistiin muun muassa vaihekohtaiset jännitteet, virrat ja tehot, taajuuden, tehokertoimen, harmoniset yliaallot, välkynnän, kuopat ja kohoumat, epäsymmetrian ja verkon signaalijännitteet. [62, s. 17–18]

Sähkön laadun analysointilaite mittaa ja tallentaa harmoniset yliaallot aina 50 yliaaltokomponenttiin asti. Harmonisiin yliaaltoihin liittyvät arvot, kuten tasajännitekomponentti, THD ja K-arvo tulevat myös mitatuksi analysointilaiteella. [62, s. 45] Liitteessä 2 on esitetty analysointilaitteen tekniset tiedot harmonisten yliaaltojen mittaustulosten, erottelukyvyn ja tarkkuuden osalta.

Fluke 435 sähkön laadun analysointilaitteen lisäksi mittauksissa on käytetty Fluke i400s AC-virtapihtejä, joissa on BNC-lähdöt ja joiden mittaustulos on 0,5-400 A. AC-virtapihtit ovat CAT IV 600 V - turvaluokiteltuja. Virtapihtien kuva on esitetty liitteessä 3 ja virtapihtien tekniset tiedot on esitetty liitteessä 4. Virtapihtien lisäksi mittauksissa käytettiin myös kytkentäjohtoja jännitteen mittaamiseen.

6.3 Mittausmenetelmä

Mittaukset on tehty standardin SFS-EN 50160 ”Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet” mukaisesti. Standardi on valittu, koska se sopii parhaiten Suomen sähköjakeluverkossa tehtäviin sähkön laadun mittauksiin. Standardi on vahvistettu suomalaiseksi kansalliseksi standardiksi, joten se soveltuu Suomessa tehtäviin sähkön laadun mittauksiin. Standardi SFS-EN 50160 antaa myös rajoja harmonisille yliaalloille, joita diplomityössä tutkitaan.

Standardin SFS-EN 50160 mukaisesti kaikkien tutkimuskohteiden kohdalla mittaustuloksena oli yksi viikko ja mittaustulokset kerättiin 10 minuutin keskiarvoina. Mittauksissa huomioitiin harmoniset yliaallot 40 komponenttiin saakka. Aurinkosähköjärjestelmä ja EC-moottori eivät toimineet mittaustuloksen aikana aina täydellä teholla, vaan todellisen käytön mukaan. Aurinkosähköjärjestelmä tuotti energiaa ainoastaan päivisin auringon paistaessa, joten öisin se ei ollut käynnissä. EC-moottori sen sijaan oli käynnissä koko mittaustuloksen aikana, mutta rakennusautomaatio sääti sen pyörimisnopeutta liikuntatilojen hiilidioksidin ja suhteellisen kosteuden mukaan. Ainoastaan LED-valaistus oli päällä täydellä teholla koko mittaustuloksen aikana, myös öisin.

Mittauskytkennät tehtiin sähkön laadun analysointilaitteen valmistajan ohjeen mukaan. Aurinkosähköjärjestelmän ja EC-moottorin mittauksissa kytkentä oli kolmivaiheinen, LED-valaistuksen mittauksessa kytkentä oli yksivaiheinen. Mittauskytkennöissä oli huomiotava mitattavan virtapiirin virran kulkusuunta virtapihtejä kytkettäessä, sillä esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmä syöttää virtaa verkkoon päin kun taas muut tutkimuskohteet ottavat virtaa verkosta. Kolmivaiheinen mittauskytkentä on esitetty liitteessä 5 ja kuva mittaustilanteesta on esitetty liitteessä 6.

Mittausten mittauspisteenä ei käytetty standardissa SFS-EN 501460 määriteltyä verkon käyttäjän liittämiskohtaa, vaan mittauskytkentä toteutettiin tutkimuskohteiden sähköä syöttävissä jakokeskuksissa. Näin ollen tämän diplomityön mittauksissa mittauspiste on se rajapinta, johon on yhdistetty mitattava tutkimuskohde ja rakennuksen sähköverkko.

Mittauksissa mitattiin ja tallennettiin analysaattorin muistiin tutkimuskohteiden jännitteen, virran ja tehon harmoniset yksittäis- ja kokonaissäröt aina 40 yliaaltoon saakka. Lisäksi mitattiin ja tallennettiin vaihejännitteet ja -virrat, tehokertoimet sekä pätö-, lois- ja näennäistehot. Mittauksista saatu materiaali on hyvin laaja, joten se ei ole tämän työn liitteenä, vaan se on saatavissa HKR-Rakennuttajan taloteknisen toimiston sähköiseltä U-asemalta.

7 Tutkimustulokset

Tutkimustuloksissa esitetään jännitteen ja virran harmonisten yliaaltojen lisäksi myös tehon harmoniset yliaallot. Tehon harmoniset yliaallot esitetään, koska niiden perusteella voidaan päätellä virran harmonisten yliaaltojen kulkusuunta. Harmoniset yksittäissäröt mitattiin 40 yliaaltoon saakka, mutta tuloksissa ne esitetään ainoastaan 25 yliaaltoon saakka, koska sitä suuremmat yliaallot ovat pieniä ja hyvin arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi.

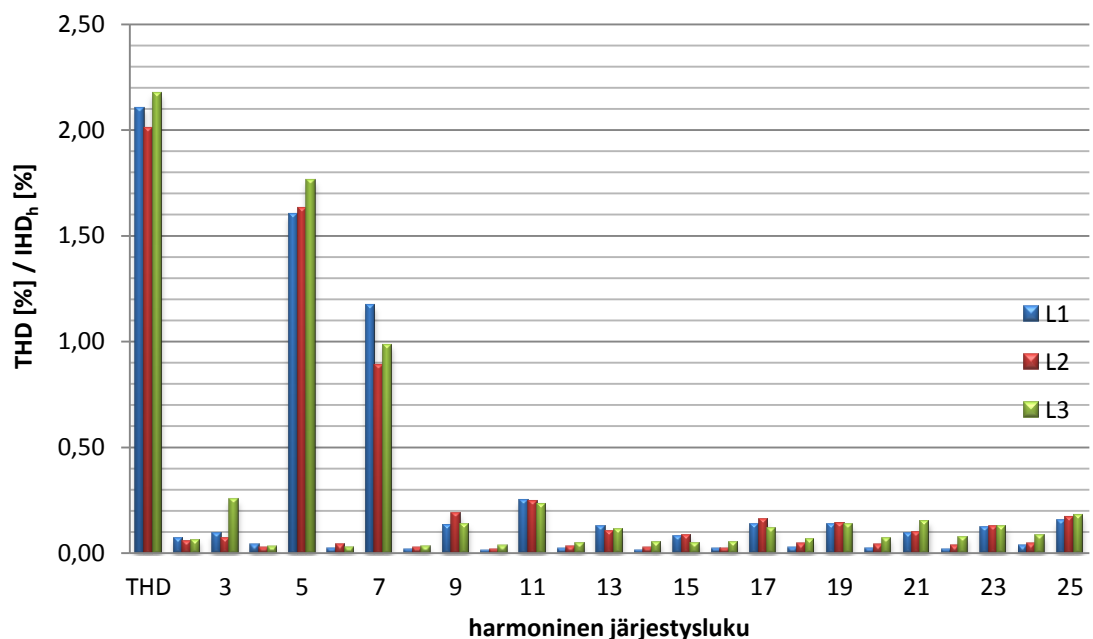
Kaikista tutkimuskohteista mitattuja jännitteen harmonisia yliaaltoja verrataan standardissa SFS-EN 50160 sallittuihin arvoihin. Virran harmonisia yliaaltoja verrataan standardissa IEC 61000-3-2 sallittuihin arvoihin ainoastaan LED-valaistuksen osalta. Aurinkosähköjärjestelmän ja EC-moottorin virran harmonisia yliaaltoja ei voida verrata standardin IEC 61000-3-2 raja-arvoihin, koska kyseinen standardi esittää aurinkosähköjärjestelmälle ja EC-moottorille ainoastaan absoluuttiset raja-arvot, joita ei kuitenkaan ollut mahdollista mitata.

7.1 Aurinkosähköjärjestelmä

Aurinkosähköjärjestelmän sähkön laadun mittaukset on suoritettu Latokartanon peruskoulussa aikavälillä 4-10.8.2011. Mittausajankohdaksi on valittu kesäviikko, jotta aurinkosähköjärjestelmä tuottaisi sähköä mahdollisimman paljon.

7.1.1 Jännitteen harmoniset yliaallot

Kuvassa 20 on esitetty aurinkosähköjärjestelmän jännitteen harmonisten yliaaltojen spektri, josta ilmenee harmoninen kokonaissärö (THD), joka huomioi kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka, sekä harmoniset yksittäissäröt (IHD_h) 25 yliaaltoon saakka vaiheiden L1, L2 ja L3 osalta.



Kuva 20. Aurinkosähköjärjestelmän jännitteen harmonisten yliaaltojen spektri.

Kuvasta 20 voidaan havaita, että aurinkosähköjärjestelmän jännitteen harmonisista yliaaltokomponenteista 5. ja 7. yliaaltokomponentti ovat hallitsevia. 5. yliaaltokomponentin harmonisen yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 1,66 % ja 7. yliaaltokomponentin harmonisen yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 1,01 %. Muiden harmonisten yliaaltokomponenttien yksittäissäröt ovat alle 0,30 %. Lisäksi voidaan havaita, että parittomat harmoniset yliaaltokomponentit ovat dominoivia verrattuna parillisiin harmonisiin yliaaltokomponentteihin. Aurinkosähköjärjestelmän jännitteen harmonisen kokonaissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 2,09 %.

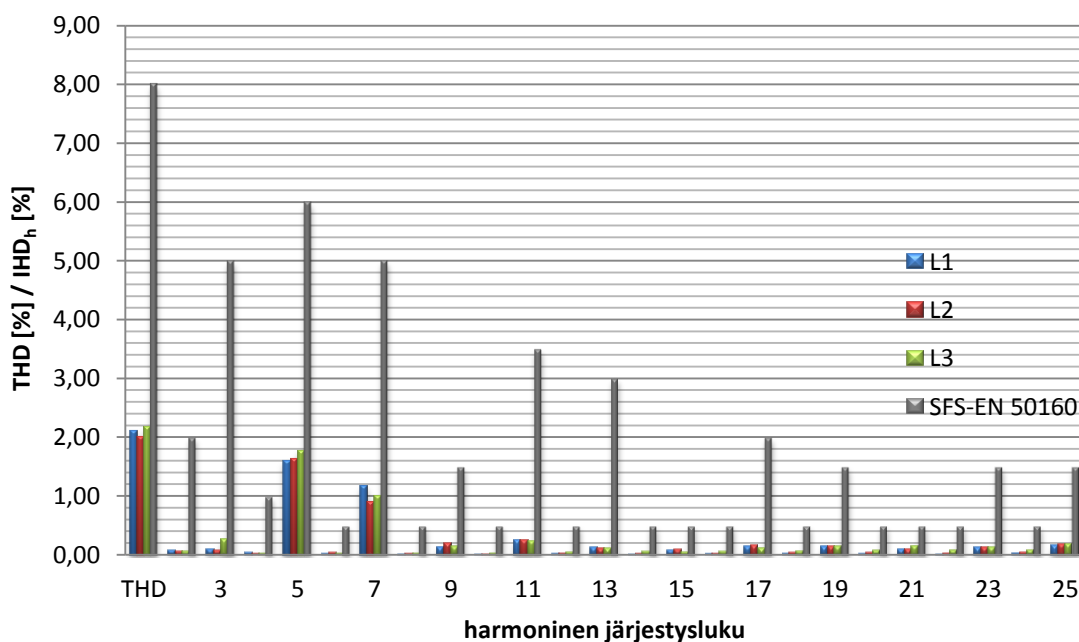
Taulukossa 3 on esitetty aurinkosähköjärjestelmän jännitteen harmonisen kokonaissärön ja yksittäissäröjen tarkat arvot vaiheiden L1, L2 ja L3 osalta.

Taulukko 3. Aurinkosähköjärjestelmän jännitteen harmonisten yliaaltojen (%) tarkat arvot.

| | THD | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| L1 | 2,10 | 0,07 | 0,09 | 0,04 | 1,60 | 0,02 | 1,17 | 0,02 | 0,13 | 0,01 | 0,25 | 0,02 | 0,12 |
| L2 | 2,01 | 0,06 | 0,07 | 0,02 | 1,63 | 0,04 | 0,89 | 0,02 | 0,19 | 0,02 | 0,24 | 0,03 | 0,10 |
| L3 | 2,17 | 0,06 | 0,25 | 0,03 | 1,76 | 0,03 | 0,98 | 0,03 | 0,13 | 0,03 | 0,23 | 0,05 | 0,11 |

| | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| L1 | 0,01 | 0,08 | 0,02 | 0,13 | 0,02 | 0,13 | 0,02 | 0,09 | 0,02 | 0,12 | 0,03 | 0,15 |
| L2 | 0,02 | 0,09 | 0,02 | 0,16 | 0,04 | 0,14 | 0,04 | 0,10 | 0,03 | 0,12 | 0,04 | 0,17 |
| L3 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,12 | 0,07 | 0,13 | 0,07 | 0,15 | 0,08 | 0,12 | 0,08 | 0,18 |

Kuvassa 21 on esitetty aurinkosähköjärjestelmän jännitteen harmoniset yliaallot sekä standardissa SFS-EN 50160 suurimmat sallitut arvot jännitteen harmonisille yliaalloille.

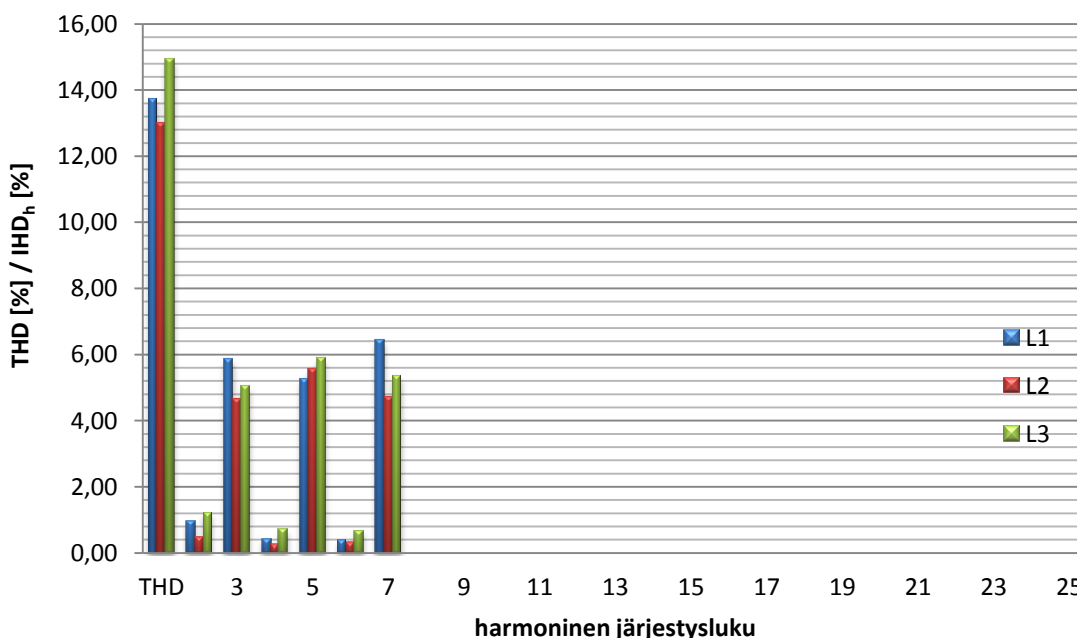


Kuva 21. Aurinkosähköjärjestelmän jännitteen harmoniset yliaallot ja standardissa SFS-EN 50160 suurimmat sallitut arvot jännitteen harmonisille yliaalloille.

Kuvasta 21 voidaan havaita, että kaikki aurinkosähköjärjestelmän jännitteen harmoniset yksittäissäröt ovat merkittävästi pienempiä kuin standardissa sallitut arvot. Myös jännitteen harmoninen kokonaissärö alittaa selvästi standardissa sallitun arvon. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että standardiin SFS-EN 50160 perustuen aurinkosähköjärjestelmä ei huononna merkittävästi rakennuksen sähköverkon jännitteen laatua.

7.1.2 Virran harmoniset yliaallot

Kuvassa 22 on esitetty aurinkosähköjärjestelmän virran harmonisten yliaaltojen spektri, josta ilmenee harmoninen kokonaissärö (THD), joka huomioi kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka, sekä harmoniset yksittäissäröt (IHD_h) 25 yliaaltoon saakka vaiheiden L1, L2 ja L3 osalta.



Kuva 22. Aurinkosähköjärjestelmän virran harmonisten yliaaltojen spektri.

Kuvasta 22 voidaan havaita, että aurinkosähköjärjestelmän virran harmonisista yliaaltokomponenteista ensimmäiset parittomat komponentit, 3., 5. ja 7., ovat hallitsevia. 3. yliaaltokomponentin yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 5,18 %, 5. yliaaltokomponentin yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 5,58 % ja 7. yliaaltokomponentin yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 5,49 %. Ensimmäisten parillisten, 2., 4. ja 6., yliaaltokomponenttien yksittäissäröt ovat alle 1,30 %. Täten voidaan todeta, että parittomat harmoniset yliaaltokomponentit ovat dominoivia verrattuna parillisiin harmonisiin yliaaltokomponentteihin. Muita virran harmonisia yliaaltokomponentteja ei mittauksissa ole ilmennyt. Aurinkosähköjärjestelmän virran harmonisen kokonaissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 13,89 %.

Taulukossa 4 on esitetty aurinkosähköjärjestelmän virran harmonisen kokonaissärön ja yksittäissäröjen tarkat arvot vaiheiden L1, L2 ja L3 osalta.

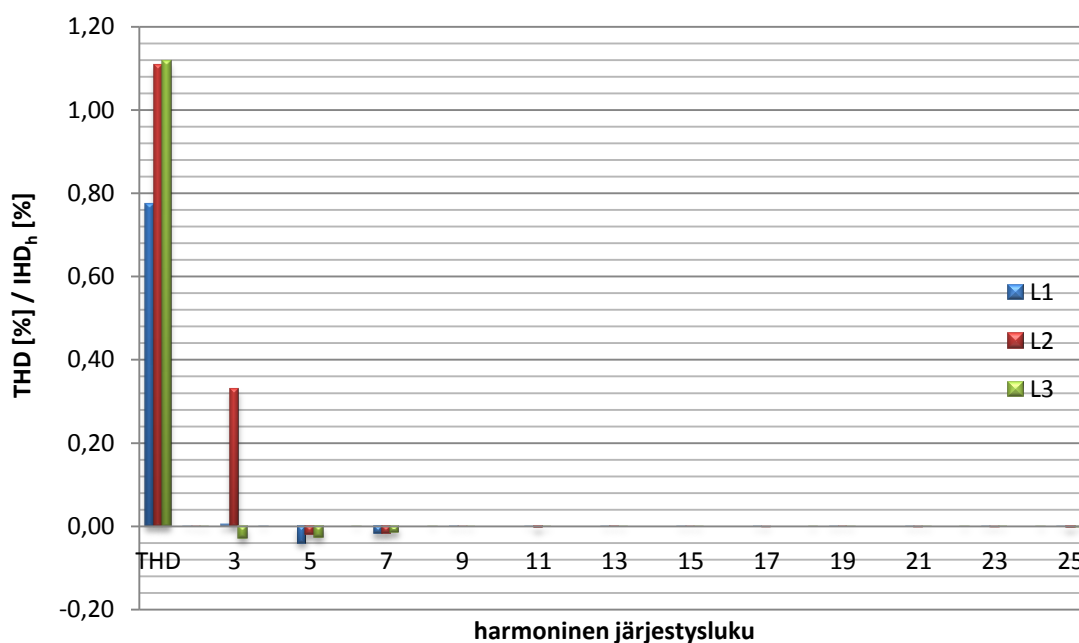
Taulukko 4. Aurinkosähköjärjestelmän virran harmonisten yliaaltojen (%) tarkat arvot.

| | THD | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| L1 | 13,73 | 0,94 | 5,85 | 0,43 | 5,25 | 0,39 | 6,43 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| L2 | 13,01 | 0,49 | 4,64 | 0,27 | 5,58 | 0,32 | 4,71 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| L3 | 14,94 | 1,22 | 5,04 | 0,72 | 5,90 | 0,67 | 5,33 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

| | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| L1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| L2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| L3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

7.1.3 Tehon harmoniset yliaallot

Kuvassa 23 on esitetty aurinkosähköjärjestelmän tehon harmonisten yliaaltojen spektri, josta ilmenee harmoninen kokonaissärö (THD), joka huomioi kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka, sekä harmoniset yksittäissäröt (IHD_h) 25 yliaaltoon saakka vaiheiden L1, L2 ja L3 osalta.



Kuva 23. Aurinkosähköjärjestelmän tehon harmonisten yliaaltojen spektri.

Kuvasta 23 voidaan havaita, että aurinkosähköjärjestelmän tehon harmonisista yliaaltokomponenteista vaiheen L2 3. yliaaltokomponentti on hallitseva. Sen yksittäissärö on 0,33 %. Vaiheen L3 3. yliaaltokomponentin sekä kaikkien vaiheiden 5. ja 7. yliaaltokomponentin yksittäissäröt sen sijaan ovat negatiivisia, noin -0,03 %:n suuruusluokkaa. Tämä tarkoittaa sitä, että näitä negatiivisten tehon yliaaltokomponentteja vastaavien virran yliaaltokomponenttien kulkusuunta on aurinkosähköjärjestelmästä sähköverkkoon päin. Positiivisten yliaaltokomponenttien

virran kulkusuunta on sen sijaan sähköverkosta aurinkosähköjärjestelmään päin. [64] Muita yliaaltokomponentteja ei mittauksissa ole ilmennyt tai niiden harmoniset yksittäissäröt ovat hyvin pieniä, noin -0,01 %:n luokkaa. Parillisia yliaaltokomponentteja ei mittauksissa ole ilmennyt ollenkaan. Aurinkosähköjärjestelmän tehon harmonisen kokonaissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 1,00 %.

Taulukossa 5 on esitetty aurinkosähköjärjestelmän tehon harmonisen kokonaissärön ja yksittäissäröjen tarkat arvot vaiheiden L1, L2 ja L3 osalta.

Taulukko 5. Aurinkosähköjärjestelmän tehon harmonisten yliaaltojen (%) tarkat arvot.

| | THD | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|----|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|
| L1 | 0,77 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -0,04 | 0,00 | -0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| L2 | 1,11 | 0,00 | 0,33 | 0,00 | -0,02 | 0,00 | -0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -0,01 | 0,00 | 0,00 |
| L3 | 1,12 | 0,00 | -0,03 | 0,00 | -0,03 | 0,00 | -0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

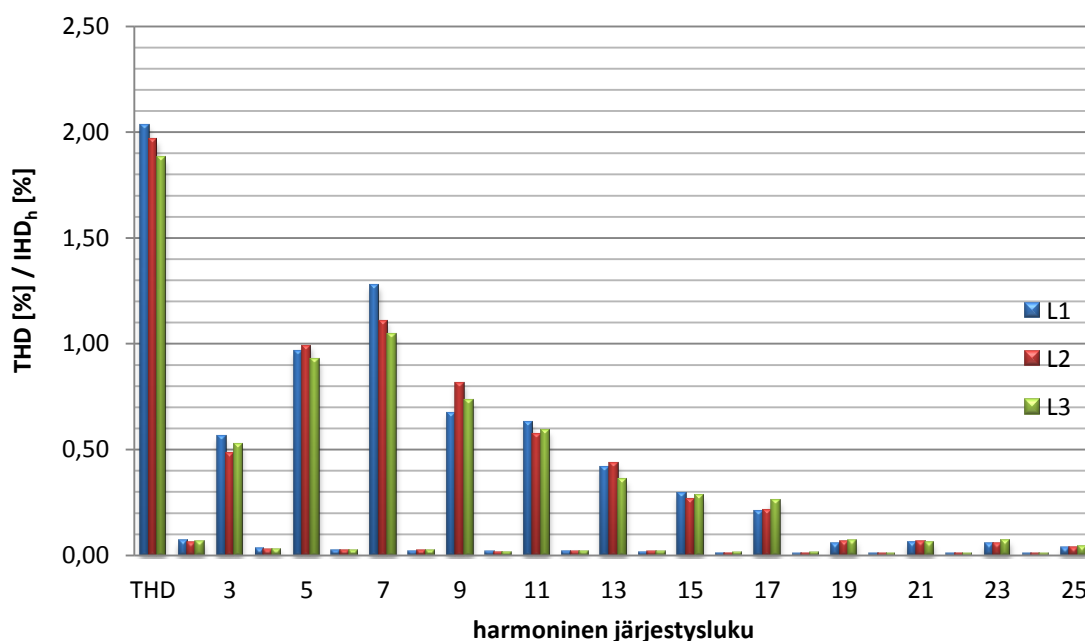
| | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| L1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| L2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -0,01 |
| L3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

7.2 EC-moottori

EC-moottorin sähkön laadun mittaukset on suoritettu Pihkapuiston ala-asteen koulussa aikavälillä 24–30.9.2011.

7.2.1 Jännitteen harmoniset yliaallot

Kuvassa 24 on esitetty EC-moottorin jännitteen harmonisten yliaaltojen spektri, josta ilmenee harmoninen kokonaissärö (THD), joka huomioi kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka, sekä harmoniset yksittäissäröt (IHD_h) 25 yliaaltoon saakka vaiheiden L1, L2 ja L3 osalta.



Kuva 24. EC-moottorin jännitteen harmonisten yliaaltojen spektri.

Kuvasta 24 voidaan havaita, että EC-moottorin jännitteen harmonisista yliaaltokomponenteista ensimmäiset parittomat yliaaltokomponentit 17. yliaaltokomponenttiin saakka ovat hallitsevia. 3. yliaaltokomponentin yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 0,52 %, 5. yliaaltokomponentin yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 0,96 %, 7. yliaaltokomponentin yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 1,15 %, 9. yliaaltokomponentin yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 0,74 %, 11. yliaaltokomponentin yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 0,60 %, 13. yliaaltokomponentin yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 0,41 %, 15. yliaaltokomponentin yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 0,28 % ja 17. yliaaltokomponentin yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 0,23 %. Muiden harmonisten yliaaltokomponenttien yksittäissäröt ovat alle 0,10 %. Lisäksi voidaan havaita, että parittomat harmoniset yliaaltokomponentit ovat dominoivia verrattuna parillisiin harmonisiin yliaaltokomponentteihin. EC-moottorin jännitteen harmonisen kokonaissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 1,96 %.

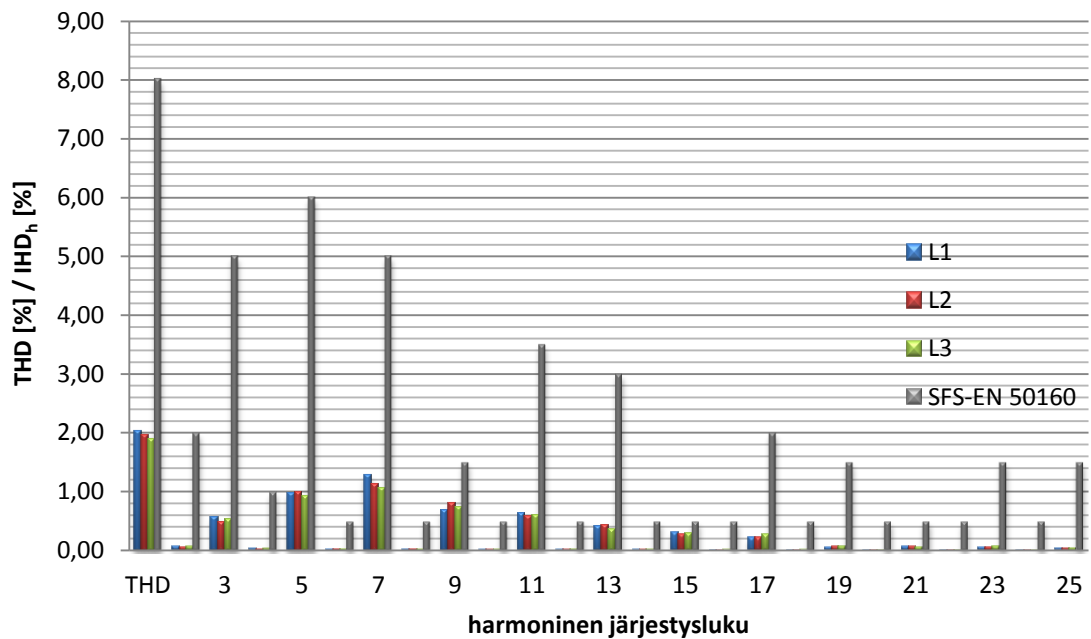
Taulukossa 6 on esitetty EC-moottorin jännitteen harmonisen kokonaissärön ja yksittäissäröjen tarkat arvot vaiheiden L1, L2 ja L3 osalta.

Taulukko 6. EC-moottorin jännitteen harmonisten yliaaltojen (%) tarkat arvot.

| | THD | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| L1 | 2,04 | 0,07 | 0,56 | 0,03 | 0,96 | 0,02 | 1,28 | 0,02 | 0,68 | 0,02 | 0,63 | 0,02 | 0,42 |
| L2 | 1,97 | 0,06 | 0,48 | 0,03 | 0,99 | 0,02 | 1,11 | 0,02 | 0,81 | 0,02 | 0,57 | 0,02 | 0,44 |
| L3 | 1,88 | 0,06 | 0,52 | 0,03 | 0,92 | 0,03 | 1,05 | 0,02 | 0,73 | 0,02 | 0,59 | 0,02 | 0,36 |

| | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| L1 | 0,02 | 0,29 | 0,01 | 0,21 | 0,01 | 0,05 | 0,01 | 0,06 | 0,01 | 0,05 | 0,01 | 0,04 |
| L2 | 0,02 | 0,27 | 0,01 | 0,22 | 0,01 | 0,06 | 0,01 | 0,06 | 0,01 | 0,06 | 0,01 | 0,04 |
| L3 | 0,02 | 0,28 | 0,01 | 0,26 | 0,01 | 0,07 | 0,01 | 0,06 | 0,01 | 0,07 | 0,01 | 0,04 |

Kuvassa 25 on esitetty EC-moottorin jännitteen harmoniset yliaallot ja standardissa SFS-EN 50160 suurimmat sallitut arvot jännitteen harmonisille yliaalloille.

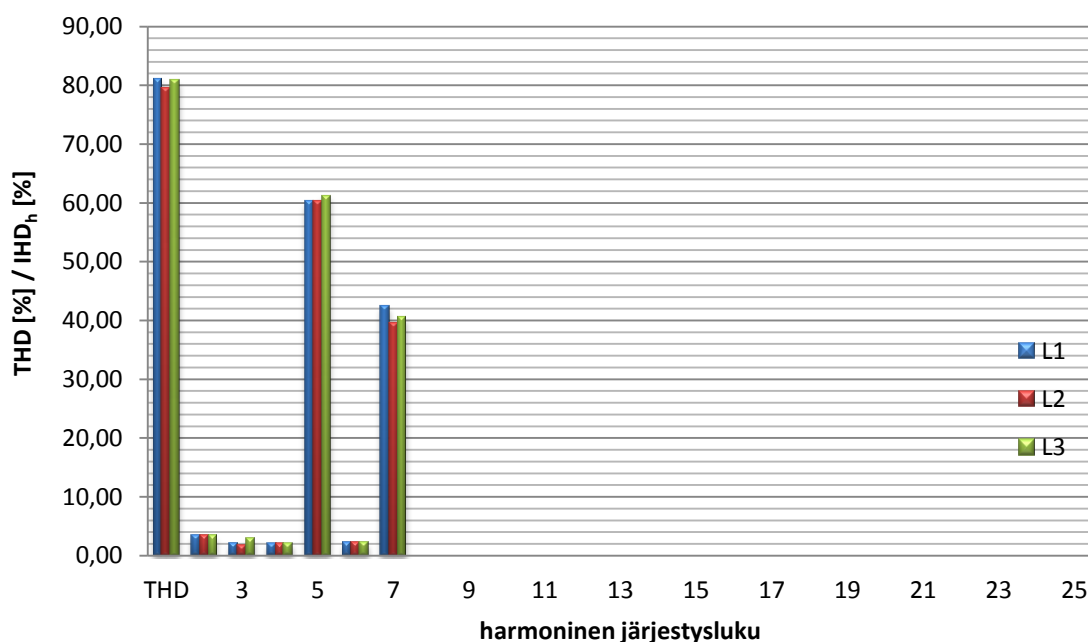


Kuva 25. EC-moottorin jännitteen harmoniset yliaallot ja standardissa SFS-EN 50160 suurimmat sallitut arvot jännitteen harmonisille yliaalloille.

Kuvasta 25 voidaan havaita, että kaikki EC-moottorin jännitteen harmoniset yksittäissäröt ovat merkittävästi pienempiä kuin standardissa sallitut arvot. Myös jännitteen harmoninen kokonaissärö alittaa selvästi standardissa sallitun arvon. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että standardiin SFS-EN 50160 perustuen EC-moottori ei huononna merkittävästi rakennuksen sähköverkon jännitteen laatua.

7.2.2 Virran harmoniset yliaallot

Kuvassa 26 on esitetty EC-moottorin virran harmonisten yliaaltojen spektri, josta ilmenee harmoninen kokonaissärö (THD), joka huomioi kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka, sekä harmoniset yksittäissäröt (IHD_h) 25 yliaaltoon saakka vaiheiden L1, L2 ja L3 osalta.



Kuva 26. EC-moottorin virran harmonisten yliaaltojen spektri.

Kuvasta 26 voidaan havaita, että EC-moottorin virran harmonisista yliaaltokomponenteista 5. ja 7. yliaaltokomponentti ovat hallitsevia. 5. yliaaltokomponentin yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 60,59 % ja 7. yliaaltokomponentin yksittäissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 40,81 %. 2., 3., 4. ja 6. yliaaltokomponentin yksittäissäröt ovat alle 3,50 %. Muita virran harmonisia yliaaltokomponentteja ei mittauksissa ole ilmennyt. EC-moottorin virran harmonisen kokonaissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 80,42 %.

Taulukossa 7 on esitetty EC-moottorin virran harmonisen kokonaissärön ja yksittäissäröjen tarkat arvot vaiheiden L1, L2 ja L3 osalta.

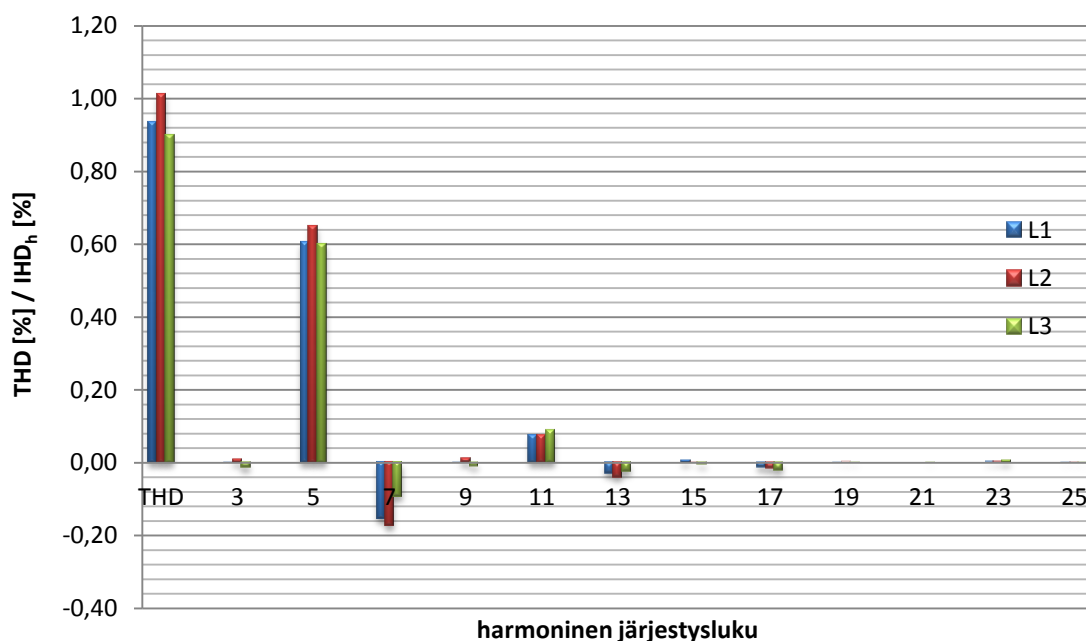
Taulukko 7. EC-moottorin virran harmonisten yliaaltojen (%) tarkat arvot.

| | THD | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|----|-------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| L1 | 80,92 | 3,37 | 2,14 | 1,99 | 60,26 | 2,27 | 42,40 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| L2 | 79,56 | 3,31 | 1,80 | 2,00 | 60,26 | 2,28 | 39,45 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| L3 | 80,79 | 3,33 | 2,81 | 2,02 | 61,24 | 2,28 | 40,57 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

| | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| L1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| L2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| L3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

7.2.3 Tehon harmoniset yliaallot

Kuvassa 27 on esitetty EC-moottorin tehon harmonisten yliaaltojen spektri, josta ilmenee harmoninen kokonaissärsö (THD), joka huomioi kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka, sekä harmoniset yksittäissärsöt (IHD_h) 25 yliaaltoon saakka vaiheiden L1, L2 ja L3 osalta.



Kuva 27. EC-moottorin tehon harmonisten yliaaltojen spektri.

Kuvasta 27 voidaan havaita, että EC-moottorin tehon harmonisista yliaaltokomponenteista 5., 7. ja 11. yliaaltokomponentti ovat hallitsevia. 5. yliaaltokomponentin yksittäissärsön kolmen vaiheen keskiarvo on 0,62 %, 7. yliaaltokomponentin yksittäissärsön kolmen vaiheen keskiarvo on -0,14 % ja 11. yliaaltokomponentin yksittäissärsön kolmen vaiheen keskiarvo on 0,08 %. Muiden parittomien yliaaltokomponenttien yksittäissärsöt poikkeavat nolasta enintään 0,05 %. Parillisia yliaaltokomponentteja ei mittauksissa ole ilmennyt ollenkaan. Negatiiviset tehon yliaaltokomponentit viittaavat siihen, että niitä vastaavien virran yliaaltokomponenttien kulkusuunta on EC-moottorista sähköverkkoon päin, positiiviset tehon yliaaltokomponentit viittaavat siihen, että niitä vastaavien virran yliaaltokomponenttien kulkusuunta on sen sijaan sähköverkosta EC-moottoriin päin. [64] EC-moottorin tehon harmonisen kokonaissärsön kolmen vaiheen keskiarvo on 0,95 %.

Taulukossa 8 on esitetty EC-moottorin tehon harmonisen kokonaissärön ja yksittäissäröjen tarkat arvot vaiheiden L1, L2 ja L3 osalta.

Taulukko 8. EC-moottorin tehon harmonisten yliaaltojen (%) tarkat arvot.

| | THD | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|----|------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|-------|
| L1 | 0,94 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,61 | 0,00 | -0,15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | -0,03 |
| L2 | 1,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,65 | 0,00 | -0,17 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | -0,04 |
| L3 | 0,90 | 0,00 | -0,01 | 0,00 | 0,60 | 0,00 | -0,09 | 0,00 | -0,01 | 0,00 | 0,09 | 0,00 | -0,03 |

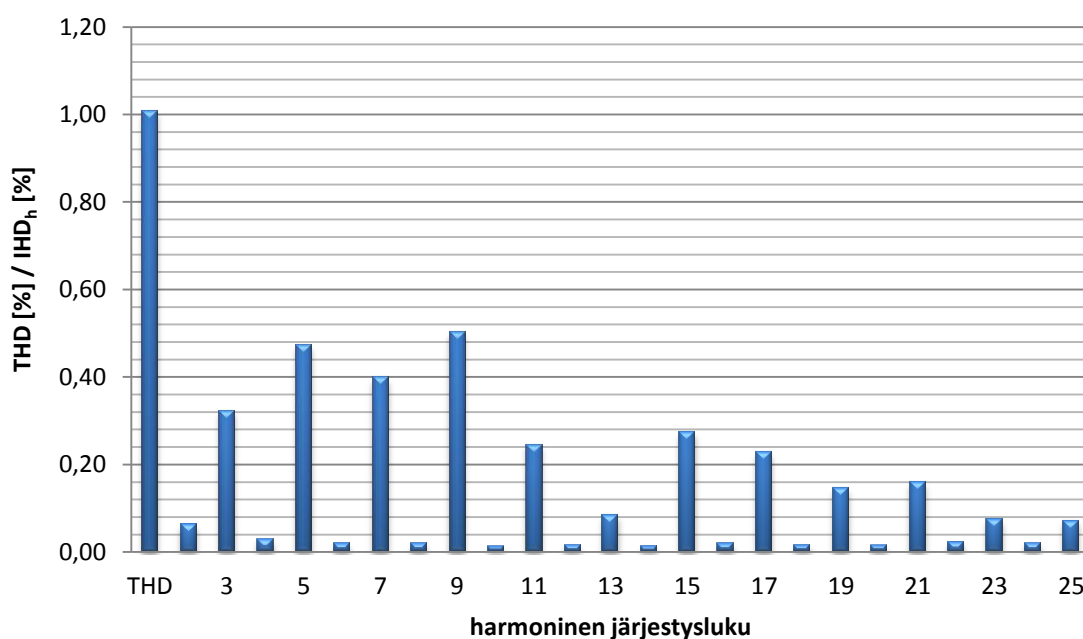
| | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|----|------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| L1 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | -0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| L2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| L3 | 0,00 | -0,01 | 0,00 | -0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |

7.3 LED-valaistus

LED-valaistuksen sähkön laadun mittaukset on suoritettu Hietakummun ala-asteen koulussa aikavälillä 14–27.7.2011. Mittausjakson aikana LED-valaistus oli päällä ympäri vuorokauden.

7.3.1 Jännitteen harmoniset yliaallot

Kuvassa 28 on esitetty LED-valaistuksen jännitteen harmonisten yliaaltojen spektri, josta ilmenee harmoninen kokonaissärö (THD), joka huomioi kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka, sekä harmoniset yksittäissäröt (IHD_h) 25 yliaaltoon saakka.



Kuva 28. LED-valaistuksen jännitteen harmonisten yliaaltojen spektri.

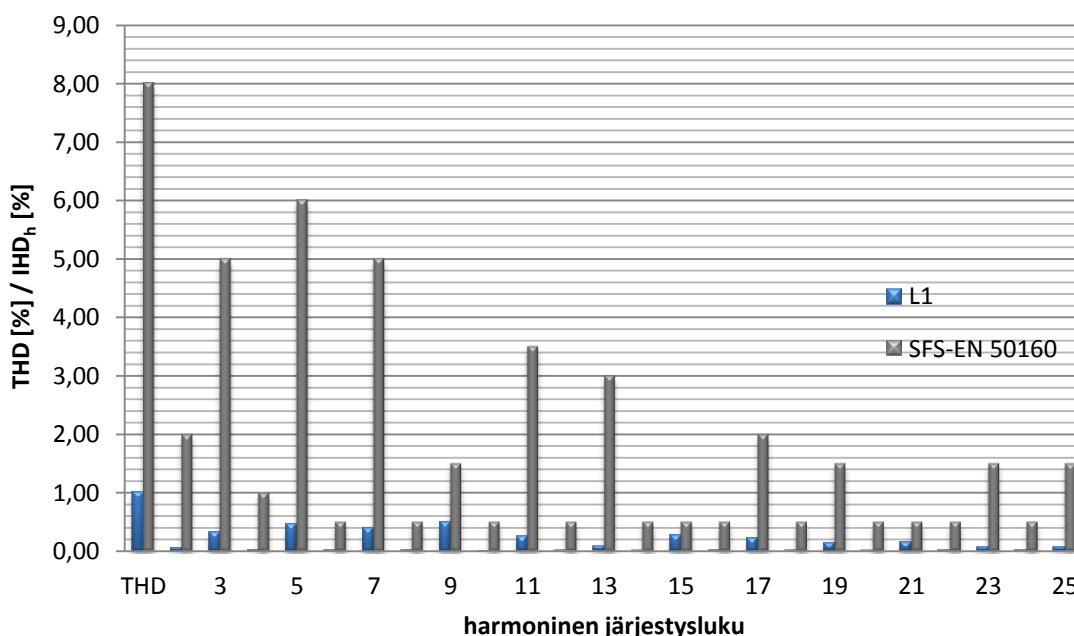
Kuvasta 28 voidaan havaita, että LED-valaistuksen jännitteen harmonisista yliaaltokomponenteista ensimmäiset parittomat yliaaltokomponentit 17. yliaaltokomponenttiin saakka ovat hallitsevia. Muiden harmonisten yliaaltokomponenttien yksittäissäröt ovat alle 0,20 %. Edellä havaittujen parittomien harmonisten yliaaltokomponenttien lisäksi myös muut parittomat yliaaltokomponentit ovat dominoivia verrattuna parillisiin yliaaltokomponentteihin. LED-valaistuksen jännitteen harmoninen kokonaissärö on 1,01 %.

Taulukossa 9 on esitetty LED-valaistuksen jännitteen harmonisen kokonaissärön ja yksittäissäröjen tarkat arvot.

Taulukko 9. LED-valaistuksen jännitteen harmonisten yliaaltojen (%) tarkat arvot.

| THD | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1,01 | 0,06 | 0,32 | 0,03 | 0,47 | 0,02 | 0,40 | 0,02 | 0,50 | 0,01 | 0,24 | 0,02 | 0,08 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| | 0,01 | 0,27 | 0,02 | 0,23 | 0,02 | 0,14 | 0,01 | 0,16 | 0,02 | 0,07 | 0,02 | 0,07 |

Kuvassa 29 on esitetty LED-valaistuksen jännitteen harmoniset yliaallot ja standardissa SFS-EN 50160 suurimmat sallitut arvot jännitteen harmonisille yliaalloille.

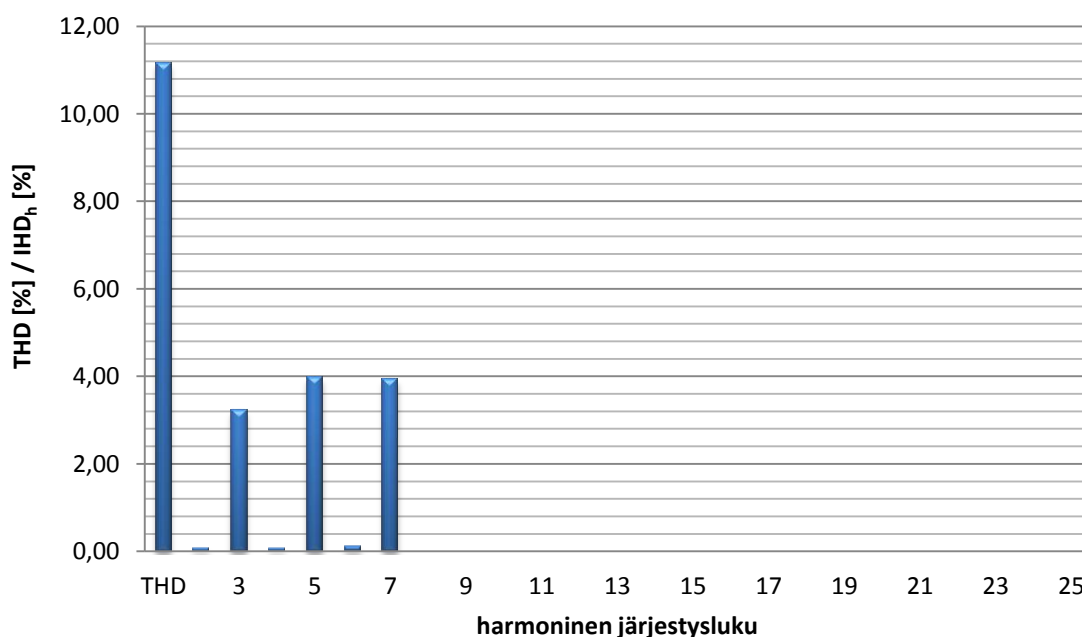


Kuva 29. LED-valaistuksen jännitteen harmoniset yliaallot ja standardissa SFS-EN 50160 suurimmat sallitut arvot jännitteen harmonisille yliaalloille.

Kuvasta 29 voidaan havaita, että kaikki LED-valaistuksen jännitteen harmoniset yksittäissäröt ovat merkittävästi pienempiä kuin standardissa sallitut arvot. Myös jännitteen harmoninen kokonaissärö alittaa selvästi standardissa sallitun arvon. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että standardiin SFS-EN 50160 perustuen LED-valaistus ei huononna merkittävästi rakennuksen sähköverkon jännitteen laatua.

7.3.2 Virran harmoniset yliaallot

Kuvassa 30 on esitetty LED-valaistuksen virran harmonisten yliaaltojen spektri, josta ilmenee harmoninen kokonaissärö (THD), joka huomioi kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka, sekä yksittäissäröt (IHD_h) 25 yliaaltoon saakka.



Kuva 30. LED-valaistuksen virran harmonisten yliaaltojen spektri.

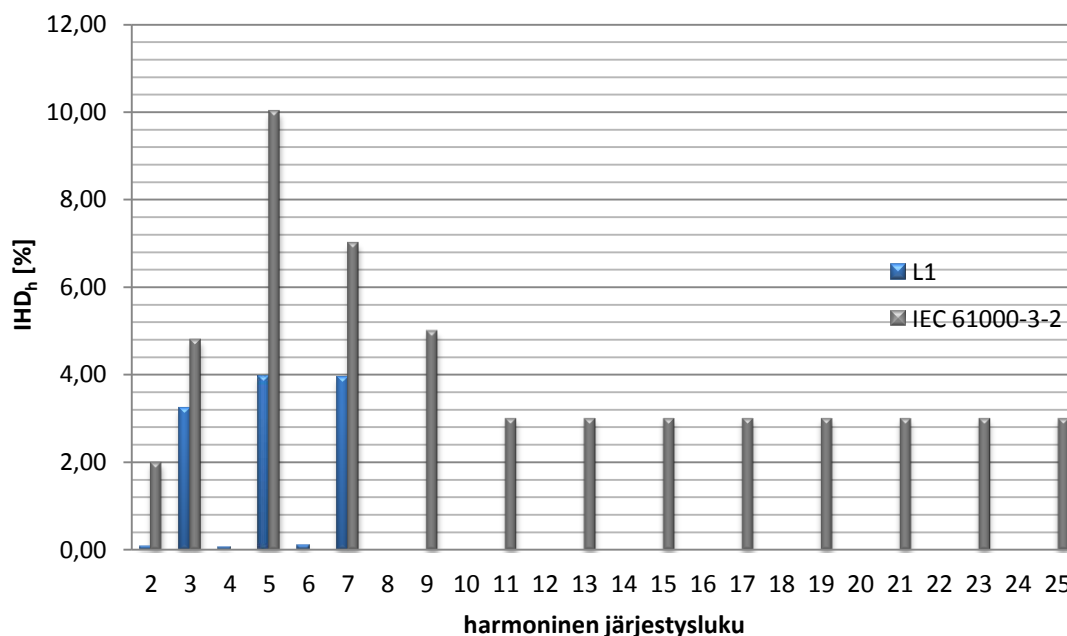
Kuvasta 30 voidaan havaita, että LED-valaistuksen virran harmonisista yliaaltokomponenteista 3., 5. ja 7. yliaaltokomponentit ovat hallitsevia. Ensimmäisten parillisten, 2., 4. ja 6., yliaaltokomponenttien yksittäissäröt ovat enintään 0,10 %. Täten voidaan todeta, että parittomat harmoniset yliaaltokomponentit ovat dominoivia verrattuna parillisiin harmonisiin yliaaltokomponentteihin. Muita virran harmonisia yliaaltokomponentteja ei mittauksissa ole ilmennyt. LED-valaistuksen virran harmoninen kokonaissärö on 11,16 %.

Taulukossa 10 on esitetty LED-valaistuksen virran harmonisen kokonaissärön ja yksittäissäröjen tarkat arvot.

Taulukko 10. LED-valaistuksen virran harmonisten yliaaltojen (%) tarkat arvot.

| THD | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 11,16 | 0,07 | 3,22 | 0,06 | 3,96 | 0,10 | 3,93 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Kuvassa 31 on esitetty LED-valaistuksen virran harmoniset yliaallot sekä standardissa IEC 61000-3-2 suurimmat sallitut arvot virran harmonisille yliaalloille.

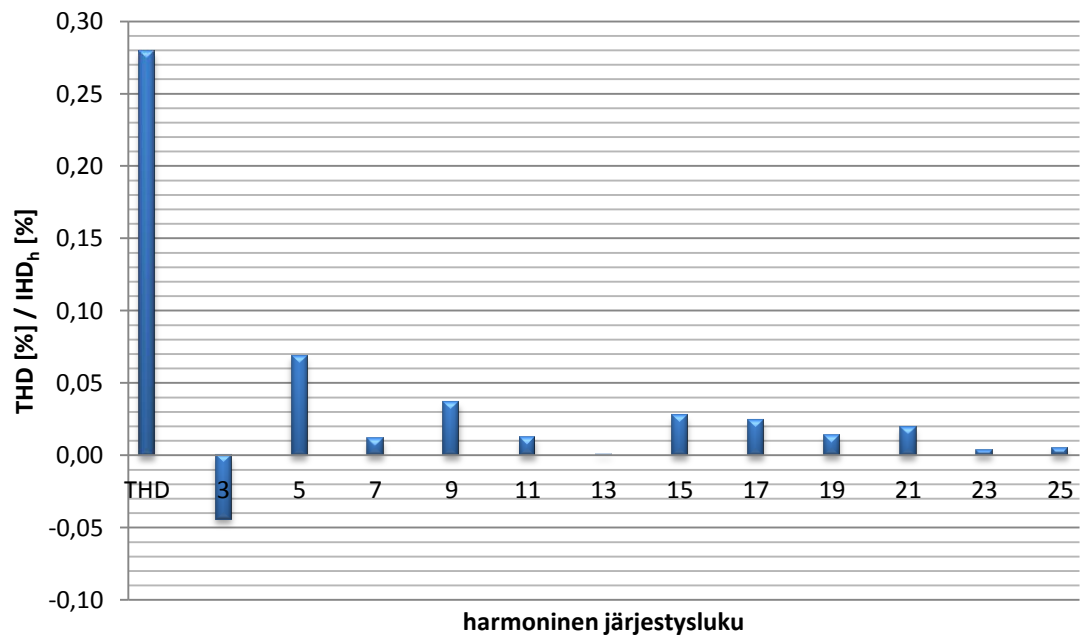


Kuva 31. LED-valaistuksen virran harmoniset yliaallot ja standardissa IEC 61000-3-2 suurimmat sallitut arvot virran harmonisille yliaalloille.

Kuvasta 31 voidaan havaita, että kaikki LED-valaistuksen virran harmonisten yliaaltokomponenttien, paitsi 3. harmonisen yliaaltokomponentin, yksittäissäröt ovat merkittävästi pienempiä kuin standardissa sallitut arvot. 3. harmonisen yliaaltokomponentin yksittäissärö on 3,22 %, mikä on 1,58 prosenttiyksikköä vähemmän kuin standardissa sallittu arvo 4,8 %. Virran harmoniselle kokonaissärölle ei standardissa ole annettu raja-arvoa, mutta koska virran harmoniset yksittäissäröt ovat standardin sallimissa rajoissa, voidaan olettaa, että harmoninen kokonaissärökin on hyväksyttävällä tasolla. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että standardiin IEC 61000-3-2 perustuen LED-valaistus ei huononna merkittävästi rakennuksen sähköverkon virran laatua.

7.3.3 Tehon harmoniset yliaallot

Kuvassa 32 on esitetty LED-valaistuksen tehon harmonisten yliaaltojen spektri, josta ilmenee harmoninen kokonaissärö (THD), joka huomioi kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka, sekä harmoniset yksittäissäröt (IHD_h) 25 yliaaltoon saakka.



Kuva 32. LED-valaistuksen tehon harmonisten yliaaltojen spektri.

Kuvasta 32 voidaan havaita, että LED-valaistuksen tehon harmonisista yliaaltokomponenteista 3. ja 5. yliaaltokomponentti ovat hallitsevia. Muiden parittomien tehon harmonisten yliaaltokomponenttien yksittäissäröt ovat enintään 0,04 %. 3. yliaaltokomponentti on negatiivinen, joten sitä vastaavan virran yliaaltokomponentin kulkusuunta on LED-valonlähteistä sähköverkkoon päin. Muut parittomat tehon yliaaltokomponentit ovat positiivisia, joten niitä vastaavien virran yliaaltokomponenttien kulkusuunta on sen sijaan sähköverkosta LED-valonlähteisiin päin. [64] Parillisia yliaaltokomponentteja ei mittauksissa ole ilmennyt ollenkaan.

Taulukossa 11 on esitetty LED-valaistuksen tehon harmonisen kokonaissärön ja yksittäissäröjen tarkat arvot.

Taulukko 11. LED-valaistuksen tehon harmonisten yliaaltojen (%) tarkat arvot.

| THD | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,28 | 0,00 | -0,04 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |

8 Johtopäätökset

8.1 Keskeiset tutkimustulokset

Tutkimustulosten perusteella voidaan johtopäätöksenä ja ratkaisuna diplomityön tutkimusongelmaan todeta, että työssä tarkasteltavat aurinkosähköjärjestelmä, EC-moottori ja LED-valaistus eivät aiheuta standardissa SFS-EN 50160 sallittuja arvoja ylittäviä jännitteen harmonisia yliaaltoja ja näin ollen eivät myöskään huononna merkittävästi rakennuksen sähköverkon jännitteen laatua. Kaikki diplomityön mittauksissa mitatut jännitteen yksittäis- ja kokonaissäröt ovat pienempiä kuin standardissa SFS-EN 50160 sallitut arvot.

Mitatuista aurinkosähköjärjestelmän jännitteen harmonisista yliaaltokomponenteista 5. ja 7. yliaaltokomponentti osoittautuivat hallitseviksi. Sen sijaan EC-moottorin ja LED-valaistuksen jännitteen harmonisista yliaaltokomponenteista ensimmäiset parittomat yliaaltokomponentit aina 17. yliaaltokomponenttiin saakka olivat hallitsevia. Jännitteen harmonisten yliaaltokomponenttien tutkimustuloksista on selvästi havaittavissa se, että parittomat yliaallot ovat dominoivia verrattuna parillisiin yliaaltoihin.

Mittausten perusteella aurinkosähköjärjestelmän jännitteen harmonisen kokonaissärön kolmen vaiheen keskiarvo on 2,09 % ja EC-moottorin vastaava arvo on 1,96 %. LED-valaistuksen jännitteen harmoninen kokonaissärö on mittausten perusteella 1,01 %. Näin ollen kaikkien työn tutkimuskohteiden jännitteen kokonaissäröt ovat suhteellisen samansuuruisia. Standardissa SFS-EN 50160 suurin sallittu jännitteen kokonaissärön arvo on 8 %.

Tutkimustulosten perusteella voidaan toisena johtopäätöksenä todeta, että työssä tarkasteltava LED-valaistus ei aiheuta standardissa IEC 61000-3-2 sallittuja arvoja ylittäviä virran harmonisia yliaaltoja ja näin ollen ei myöskään huononna merkittävästi rakennuksen sähköverkon virran laatua. Mitatuista LED-valaistuksen virran harmonisista yliaaltokomponenteista 3., 5. ja 7. yliaaltokomponentti osoittautuivat hallitseviksi ja virran harmoniseksi kokonaissäröksi mitattiin 11,16 %. Virran harmoniselle kokonaissärölle ei standardissa ole annettu raja-arvoa, mutta koska virran harmoniset yksittäissäröt ovat standardin sallimissa rajoissa, voidaan olettaa, että kokonaissärökin on hyväksyttävällä tasolla.

Mitatuista aurinkosähköjärjestelmän virran harmonisista yliaaltokomponenteista 3., 5. ja 7. yliaaltokomponentti osoittautuivat hallitseviksi ja virran harmonisen kokonaissärön kolmen vaiheen keskiarvoksi mitattiin 13,89 %. EC-moottorin virran harmonisista yliaaltokomponenteista 5. ja 7. yliaaltokomponentti osoittautuivat hallitseviksi ja virran harmonisen kokonaissärön kolmen vaiheen keskiarvoksi mitattiin 80,42 %. Koska aurinkosähköjärjestelmän ja EC-moottorin aiheuttamia virran harmonisten yliaaltojen arvoja ei ollut mahdollista verrata standardissa IEC 61000-3-2 sallittuihin arvoihin, minkäänlaisia johtopäätöksiä kyseisten laitteiden vaikutuksesta sähköverkon laatuun ei voida esittää.

Myös virran harmonisten yliaaltokomponenttien tutkimustuloksista on selvästi havaittavissa se, että parittomat yliaallot ovat dominoivia verrattuna parillisiin yliaaltoihin. Erityisesti 3., 5. ja 7. harmoninen yliaaltokomponentti esiintyivät muita parittomia yliaaltokomponentteja useammin tutkimuskohteiden virran harmonisten

yliaaltojen spektreissä. Näin ollen tulevaisuudessa on aurinkosähköjärjestelmien, EC-moottoreiden ja LED-valaistuksen hankinnan yhteydessä kiinnitettävä huomiota erityisesti näihin yliaaltoihin ja harkittava näiden yliaaltojen mahdollista suodatusta. Tämän lisäksi tutkimustulosten perusteella on havaittavissa, että virran harmonisia yliaaltokomponentteja esiintyy kaikissa tutkimuskohteissa ainoastaan 7. harmoniseen yliaaltoon saakka. Sitä suuremman harmonisen järjestysluvun yliaaltokomponentteja ei diplomityön mittausten yhteydessä ole havaittu ollenkaan.

Diplomityössä tutkittiin myös tehon harmonisia yliaaltokomponentteja, joiden perusteella pääteltiin mihin suuntaan vastaavat virran harmoniset yliaallot kulkevat. Mittausten perusteella havaittiin, että aurinkosähköjärjestelmä syöttää sähköverkkoon vaiheen L3 3. virran yliaaltokomponentin samoin kuin kaikkien vaiheiden 5. ja 7. virran yliaaltokomponentitkin. Sitä vastoin vaiheen L2 3. virran yliaaltokomponentti kulkee sähköverkosta aurinkosähköjärjestelmään päin. EC-moottorin havaittiin syöttävän sähköverkkoon 7. virran yliaaltokomponentin, kun taas 5. ja 11. virran yliaaltokomponentit kulkevat sähköverkosta EC-moottoriin päin. LED-valaistuksen havaittiin mittausten perusteella syöttävän sähköverkkoon ainoastaan 3. virran yliaaltokomponentin. Muut virran parittomat yliaaltokomponentit kulkevat sähköverkosta LED-valaistukseen päin.

Tutkimustuloksilla on suuri teoreettinen merkitys, sillä ne tuovat täysin uutta tietoa nopeasti yleistyvien aurinkosähköjärjestelmien, EC-moottoreiden ja LED-valaistuksen vaikutuksesta rakennusten sähköverkon laatuun. Tutkimustuloksia ei ole edes mahdollista verrata aiempien tutkimusten tuloksiin, sillä vastaavia vertailukelpoisia tutkimuksia ei ole tehty. Diplomityön tutkimustuloksilla on myös käytännön merkitys, sillä niiden valossa näyttää siltä, että Helsingin kaupunki voisi jatkaa aurinkosähköjärjestelmien, EC-moottoreiden ja LED-valaistuksen hankintaa kiinteistöihinsä. Näin ollen Helsingin kaupunki voisi jatkaa myös energiatehokkuuden parantamiseen ja kasvihuonepäästöjen vähentämiseen tähtäävien sopimusten ja ohjelmien tavoitteisiin pyrkimistä uusien energiatehokkaiden teknologioiden ja uusiutuvien energiamuotojen käytön avulla.

8.2 Tutkimustulosten luotettavuusanalyysi

Sähkön laadun mittaukset suoritettiin niin, ettei muita mahdollisesti rakennuksessa sijaitsevia yliaaltojen lähteitä ole kytketty irti rakennuksen sähköverkosta eikä tutkimuskohteita ole myöskään irrotettu yleisestä jakeluverkosta. Tämä tarkoittaa sitä, että muista mahdollisesti rakennuksessa sijaitsevista yliaaltolähteistä tai yleisestä jakeluverkosta on voinut kulkeutua harmonisia yliaaltoja mittauspisteeseen, jolloin mittauspisteessä on saattanut olla mittaushetkellä myös muualta kuin tutkimuskohteesta peräisin olevia harmonisia yliaaltoja. Mittausten yhteydessä ei kuitenkaan ollut mahdollista erottaa tutkimuskohteita muusta sähköverkosta.

Diplomityössä on oletettu, että mittauspisteenä toimiva rajapinta, johon on yhdistetty mitattava tutkimuskohde ja rakennuksen sähköverkko, on sama kuin standardissa SFS-EN 50160 määritelty verkon käyttäjän liittämiskohta, johon standardin harmonisten yliaaltojännitteiden raja-arvot on määritelty. Toinen oletus on, että standardissa IEC 61000-3-2 sallitut arvot harmonisille yliaaltovirroille ryhmän C laitteille, johon LED-valonlähteet kuuluvat, kattavat laitteiden lisäksi myös laiteryhvät. Näin ollen työssä on ollut mahdollista verrata LED-valaistuksen, joka koostui 12 valaisimesta, aiheuttamia

harmonisia yliaaltovirtoja kyseisen standardin raja-arvoihin. Nämä oletukset ovat saattaneet vaikuttaa diplomityön tutkimustuloksiin.

Diplomityön mittauksissa käytettiin Fluke 435 kolmivaiheista sähkön laadun analysaattoria, jonka jännitteen ja virran mittaustarkkuus on 0,1 %. Näin hyvän mittaustarkkuuden ansiosta analysaattorin suorituskyky on vahvistettu standardin IEC 61000-4-30 luokan A mukaiseksi. Luokan A laitteiden tulee täyttää edellä mainitun standardin korkeimmat suorituskyky- ja tarkkuusvaatimukset, joten työn mittauksissa käytetyn analysaattorin tarkkuus on korkealla tasolla.

8.3 Jatkotutkimukset

Diplomityössä mitattiin aurinkosähköjärjestelmän ja EC-moottorin aiheuttamat harmoniset yliaaltovirrat, mutta niitä ei ollut mahdollista verrata standardissa IEC-61000-3-2 sallittuihin harmonisten yliaaltovirtojen arvoihin. Vertailu ei ollut mahdollista, koska kyseinen standardi määrittelee suurimmat sallitut harmoniset yliaaltovirrat absoluuttisesti, mutta käytetyllä mittauslaitteistolla oli mahdollista mitata harmoniset yliaaltovirrat ainoastaan suhteellisesti eli harmonisen yliaaltokomponentin suhteena perustaajuiseen komponenttiin. Myöskään mikään muu tällä hetkellä olemassa oleva kansallinen tai kansainvälinen standardi ei määrittele harmonisten yliaaltovirtojen raja-arvoja työssä käytetyllä tavalla.

Näin ollen tulevaisuudessa olisi mielenkiintoista vertailla työssä mitattujen aurinkosähköjärjestelmän ja EC-moottorin aiheuttamia yliaaltovirtoja sellaisen standardin raja-arvoihin, jossa nämä raja-arvot olisi esitetty suhteellisina. Tosin tällainen vertailu on mahdollinen ainoastaan siinä tapauksessa, että edellä kuvattu standardi ilmestyy. Parhaimmassa tapauksessa tällainen standardi olisi kansallinen, standardia SFS-EN 50160 vastaava standardi harmonisille yliaaltovirroille. Tämän vertailun hyötynä olisi se, että näin olisi mahdollista saada tieto myös siitä, huonontavatko aurinkosähköjärjestelmä ja EC-moottori merkittävästi rakennusten sähköverkon virran laatua.

Aurinkosähköjärjestelmän virran harmonisen kokonaissärön kolmen vaiheen keskiarvoksi mitattiin 13,89 % ja LED-valaistuksen virran harmoniseksi kokonaissäröksi mitattiin 11,16 %. Sen sijaan EC-moottorin virran harmonisen kokonaissärön kolmen vaiheen keskiarvoksi mitattiin 80,42 %, mikä on huomattavasti suurempi kuin aurinkosähköjärjestelmän ja LED-valaistuksen virtojen kokonaissäröt. Näiden lukujen perusteella olisi kiinnostavaa tutkia EC-moottorin aiheuttamien harmonisten yliaaltovirtojen syitä sekä haittoja rakennuksen sähköverkolle ja laitteille tarkemmin, mikä voisikin olla yksi tämän diplomityön jatkotutkimuksen aiheista.

Diplomityössä tutkittiin harmonisia yliaaltoja rakennuksissa, joissa on ainoastaan yksi aurinkosähköjärjestelmä, kaksi EC-moottoria tai yksi huone, jonka valaistus on toteutettu LED-valonlähteillä. Näitä teknologioita on kuitenkin mahdollista käyttää ja niitä käytetäänkin yhdessä myös suuremmassa mittakaavassa, jolloin samassa rakennuksessa saattaa olla useita tutkimuskohteiden kaltaisia harmonisten yliaaltojen lähteitä. Täten jatkotutkimuksena voisi tutkia aurinkosähköjärjestelmien, EC-moottoreiden ja LED-valaistuksen vaikutusta rakennusten sähkön laatuun tässä diplomityössä tarkasteltua laajemmin ja verrata jatkotutkimuksen tuloksia tämän diplomityön tuloksiin.

Kirjallisuus

1. **Sähkömarkkinalaki 17.3.1995/386.** 3. luku, 9 §.
2. **SFS-EN 50160.** Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. 4. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto, 2010. 63 s.
3. **Beaty, H. Wayne & Fink, Donald G. (toim.).** Standard Handbook for Electrical Engineers. 15. painos. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2007. 1868 s. ISBN 978-0-07-144146-9.
4. **ABB Oy.** Luku 4: Sähkön laatu. [Online]. ABB Oy. 2000. [Viitattu 7.10.2011]. Saatavissa: http://heikki.pp.fi/abb/040_0007.pdf
5. **Männistö, M. et al. & Vitikka, V. (toim.).** Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähköinfo Oy, 2006. 120 s. ISBN 952-5600-19-X.
6. **Korpinen, L. et al.** Yliaalto-opus. [Online]. www.leenakorpinen.fi. 2008. [Viitattu 22.9.2011] Saatavissa: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>
7. **IEEE Std 1159–2009.** Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. 2. painos. New York, NY, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2009. 81 s.
8. **Huvila, H. & Eskelinen, S. & Holopainen, P.** Rakennusviraston energiansäästön toimintasuunnitelma vuodelle 2011. [Online]. Helsingin kaupunki, Rakennusvirasto. 2011. [Viitattu 31.3.2012]. Saatavissa: http://www.hel.fi/hki/HKR/fi/P_t_ksenteko/Asiakirja?doc=HKR_2011-06-14_Ytlk_23_El
9. **Eskelinen, S.** Johtava energia-asiantuntija. Helsingin kaupunki, Rakennusvirasto, HKR-Rakennuttaja, talotekninen toimisto. Helsinki, PL 1540, 00099 Helsingin Kaupunki. Haastattelu 21.12.2011.
10. **Helsingin kaupunki, Rakennusvirasto, HKR-Rakennuttaja.** Helsingin kaupungin palvelurakennusten matalaenergiarakentamisohje. Yleisohje. Versio 1.1. [Online]. Helsingin kaupunki. 2010. [Viitattu 22.9.2011]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/wps/wcm/connect/4b7f898045cf33739ad3ff527882ad24/Yleisohje+-Helsingin+kaupungin+palvelurakennusten+matalaenergiarakentaminen.pdf?MOD=AJPERES&lmod=1491506484>
11. **Helsingin kaupunki, Rakennusvirasto, HKR-Rakennuttaja.** Helsingin kaupungin palvelurakennusten matalaenergiarakentamisohje. LVI-suunnitteluohje. Versio 1.4. [Online]. Helsingin kaupunki. 2011. [Viitattu 22.9.2011]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/wps/wcm/connect/4b7f898045cf33739ad4ff527882ad24/LVI-suunnittelu+-Matalaenergiarakentamisen+ohjeet+2011.pdf?MOD=AJPERES&lmod=1491506484>
12. **Helsingin kaupunki, Rakennusvirasto, HKR-Rakennuttaja.** Helsingin kaupungin palvelurakennusten matalaenergiarakentamisohje. Sähkösuunnitteluohje. Versio 1.5. [Online]. Helsingin kaupunki. 2011. [Viitattu 22.9.2011]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/wps/wcm/connect/4c18200045cf33739ad5ff527882ad24/S%C3%A4hk%C3%B6suunnittelu+-Matalaenergiarakentamisen+ohjeet+2011.pdf?MOD=AJPERES&lmod=1491506484>

13. **Sankaran, C.** Power quality. Boca Raton, FL, USA: CRC Press LLC, 2002. 202 s. ISBN 0-8493-1040-7.
14. **Kusko, A. & Thompson, M.** Power quality in electrical systems. New York, NY, USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2007. 225 s. ISBN 978-0-07-147075-9.
15. **Uk Sound and Lightning Community.** 3 Phase Power Explanation. [Online]. www.ukslc.org. 2007. [Viitattu 22.11.2011]. Saatavissa: http://www.ukslc.org/articles/power/3_phase_power_explanation_200706152153.html
16. **IEEE P1409/D14.** Draft Guide for Application of Power Electronics for Power Quality Improvement on Distribution Systems Rated 1 kV through 38 kV. New York, NY, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2011. 79 s.
17. **Laughton, M.A. & Warne, D.F. (toim.).** Electrical Engineer's Reference Book. 16. painos. Oxford, UK: Elsevier Science, 2003. 1431 s. ISBN 978-0-7506-4637-6.
18. **Alanen, R. & Hätönen, H.** Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta. Espoo: VTT, 2006. 84 s. VTT Working Papers 52. ISBN 951-38-6604-1.
19. **Rogers, B.** An Overview of Power Quality Issues. [Online]. www.utterpower.com. 2005. [Viitattu 4.10.2011] Saatavissa: http://www.utterpower.com/commercial_grid.htm
20. **Cimadevilla, R. & Quintanilla, R. & Ward, S.** Adapting Protection to Frequency Changes. [Online]. ZIV grid automation. 2010. [Viitattu 5.10.2011]. Saatavissa: <http://www.gridautomation.ziv.es/notas-tecnicas/?p=231>
21. **Power Quality in Electrical Systems.** Power quality basics: Voltage unbalance. [Online]. www.powerqualityworld.com. 2011. [Viitattu 25.11.2011]. Saatavissa: <http://www.powerqualityworld.com/2011/06/voltage-unbalance-power-quality-basics.html>
22. **De La Rosa, F.** Harmonics and power systems. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Group LLC, 2006. 184 s. ISBN 0-8493-3016-5.
23. **Jauhiainen, J.** TL908Z Signaali-teoria, Osa I: Fourier-sarja. 2006. 22 s. Oulun seudun ammattikorkeakoulu, Tekniikan yksikkö.
24. **Jäntti, R.** S-72.1110 Signaalit ja järjestelmät, 2. luento. 2008. 36 s. Teknillinen korkeakoulu, Tietoliikenne- ja tietoverkkotekniikan laitos.
25. **Tuomainen, V.** S-81.2100 Tehoelektroniikka, 1. luento. 2009. 21 s. Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos.
26. **Naps systems Oy.** Aurinkosähkö. [Online]. Naps systems Oy. 2011. [Viitattu 14.12.2011]. Saatavissa: <http://www.napssystems.com/fi/solar-electricity>
27. **Ross, M. & Royer, J.** Photovoltaics in cold climates. London: James & James, 1999. 151 s. ISBN 1-873936-89-3.
28. **U.S. Department of Energy.** Semiconductors and the Built-In Electric Field for Crystalline Silicon Photovoltaic Cells. [Online]. U.S. Department of Energy. 2011. [Viitattu 15.12.2011]. Saatavissa: http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/semiconductors.html
29. **Erat, B. et al.** Aurinko-opas: aurinkoenergiaa rakennuksiin. Porvoo: Painoyhtymä Oy, 2008. 208 s. ISBN 978-952-92-2721-1.
30. **Patel, M. R.** Wind and solar power systems: design, analysis, and operation. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006. 448 s. ISBN 0-8493-1570-0.
31. **Goffman, E.** Green Buildings: Conserving the Human Habitat. [Online]. ProQuest. 2006. [Viitattu 6.4.2012]. Saatavissa: <http://www.csa.com/discoveryguides/green/review5.php>

32. **Kuluttajavirasto.** Eko-ostajan opas. [Online]. Kuluttajavirasto. 2010. [Viitattu 15.12.2011]. Saatavissa: <http://www.kuluttajavirasto.fi/fi-FI/eko-ostaja/energia-ja-vesi/aurinkosahko/>
33. **DeMeo, E. A. & Taylor, R. W.** Solar Photovoltaic Power Systems: An Electric Utility R & D Perspective. Science. [Online]. Vol. 224. 1984. S. 245–251. [Viitattu 15.12.2011]. DOI: 10.1126/science.224.4646.245.
34. **Beck, M. K.** A comprehensive solar electric system for remote areas. Desalination. [Online]. Vol. 209. 2007. S. 312–318. [Viitattu 15.12.2011]. DOI:10.1016/j.desal.2007.04.045.
35. **Ebm-papst Oy.** EC-puhaltimet, tietoisuutta ebm-papstin yhteistyökumppaneille. [Online]. Ebm-papst Oy. 2008. [Viitattu 6.11.2011]. Saatavissa: http://www.ebmpapst.fi/fi/media/news_data/teknista/Tietoisuutta_Mita_erikoista_EC-puhaltimissa.pdf
36. **Systemair Oy.** Lyhyesti EC-tekniikasta. [Online]. Systemair Oy. 2007. [Viitattu 15.12.2011] Saatavissa: <http://www1.systemair.com/fi/Suomi/Systemairin-tuotteet/Ajankohtaista/EC/>
37. **Fläkt Woods Oy.** Maailman paras kammiopuhallin on nyt entistä parempi. [Online]. Fläkt Woods Oy. 2008. [Viitattu 15.12.2011]. Saatavissa: <http://www.flaktwoods.fi/87adada6-568b-4484-ab84-a439762303d4>
38. **Mazurkiewicz, J.** Electronic commutation. [Online]. Motion System Design. 2000. [Viitattu 15.12.2011]. Saatavissa: http://fab.cba.mit.edu/classes/MIT/961.04/topics/brushless_DC1.pdf
39. **Palfrey, C.** The synergy of EC motors and FCUs. [Online]. Modern Building Services. 2006. [Viitattu 15.12.2011]. Saatavissa: http://www.modbs.co.uk/news/fullstory.php/aid/2338/The_synergy_of_EC_motors_and_FCUs.html
40. **Axair Fans UK Ltd.** Technical – EC Technology & EC Fans. [Online]. Axair Fans UK Ltd. 2004–2011. [Viitattu 18.12.2011]. Saatavissa: <http://www.axair-fans.co.uk/technical.php?technical=ectech>
41. **Fläkt Woods Oy.** EC-moottorit. [Online]. Fläkt Woods Oy. 2011. [Viitattu 15.12.2011]. Saatavissa: <http://www.flaktwoods.fi/erityisosaamisemme/energiatehokkuus/ec-moottorit/>
42. **Jahkonen, J.** S-118.3216 Valaistustekniikka I, LEDit valaistuksessa. 2011. 34 s. Aalto yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu, Elektroniikan laitos.
43. **Winder, S.** Power Supplies for LED Driving. Burlington, MA: Elsevier Inc., 2008. 232 s. ISBN 978-0-7506-8341-8.
44. **Tuominen, A.** LED (Light Emitting Diode, valodiodi). [Online]. Easy Led Oy. 2007. [Viitattu 20.12.2011]. Saatavissa: http://www.led1.fi/led_teknologia
45. **Stenman, F.** S-118.3218 Valaistustekniikka II, Ledien ominaisuudet suunnittelun kannalta. 2011. 12 s. Aalto yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu, Elektroniikan laitos.
46. **Schneider, T.** Aurinkosähköjärjestelmien tuottaman tasavirran käyttö toimistorakennusten LED-valaistusjärjestelmissä. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta. Espoo. 2009. 71 s.
47. **Deygoo, C.** The Light Emitting Diode. [Online]. www.enlightenyourmind.net. 2011. [Viitattu 6.4.2012]. Saatavissa: <http://enlightenyourmind.net/Technologies/led.html>
48. **U.S. Department of Energy.** LED Basics. [Online]. U.S. Department of Energy. 2011. [Viitattu 22.12.2011] Saatavissa: http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/sslbasics_ledbasics.html#how_long

49. **IEC 61000-3-2.** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase). Painos 3.2. Geneve, Sveitsi: The International Electrotechnical Commission, 2009. 70 s.
50. **e³Portaali.** Kuntakohtaiset. [Online]. VTT. 2011. [Viitattu 27.12.2011]. Saatavissa: <http://e3portal.vtt.fi/>
51. **Latokartanon peruskoulu.** Koulun esittely. [Online]. Helsingin kaupunki, Opetusvirasto. 2011. [Viitattu 27.12.2011]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/hki/latopk/fi/Etusivu>
52. **Eskelinen, S.** Johtava energia-asiantuntija. Helsingin kaupunki, Rakennusvirasto, HKR-Rakennuttaja, talotekninen toimisto. Helsinki, PL 1540, 00099 Helsingin Kaupunki. Haastattelu 28.12.2011.
53. **Buildercom Oy.** FacilityInfo. [Online]. Buildercom Oy. 2011. [Viitattu 27.12.2011]. Saatavissa: <https://www.buildercom.net/fi/Login.asp>
54. **Zaitsev, A.** Energia-asiantuntija. Helsingin kaupunki, Rakennusvirasto, HKR-Rakennuttaja, talotekninen toimisto. Helsinki, PL 1540, 00099 Helsingin Kaupunki. Haastattelu 28.12.2011.
55. **Posharp Inc.** NP 200 GK Solar Panel from Naps systems. [Online]. Posharp Inc. 2011. [Viitattu 27.12.2011]. Saatavissa: http://www.posharp.com/np-200-gk-solar-panel-from-naps-systems_p2019794280d.aspx
56. **Pihkapuiston ala-asteen koulu.** Tervetuloa kouluumme. [Online]. Helsingin kaupunki, Opetusvirasto. 2011. [Viitattu 27.12.2011]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/hki/pihkaa/fi/Etusivu>
57. **Ohtonen, H. & Nurmi, M.** Pihkapuiston ala-asteen koulu, Energiakatselmusraportti. Helsinki: Insinööritoimisto Nurmi Oy, 1998. 20 s.
58. **Helimaa, H.** Myynti-insinööri. Recair Oy. Mukulakuja 3, 04300 Tuusula. Puhelinhaastattelu 30.12.2011.
59. **Hietakummun ala-asteen koulu.** Koulun esittely. [Online]. Helsingin kaupunki, Opetusvirasto. 2011. [Viitattu 27.12.2011]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/hki/hietaaa/fi/Etusivu>
60. **Ohtonen, H. & Nurmi, M.** Malmin lukio & Hietakummun ala-asteen koulu, Energiakatselmusraportti. Helsinki: Insinööritoimisto Nurmi Oy, 1998. 20 s.
61. **Valtavallo Oy.** ELITE G2 LED-valoputket. [Online]. Valtavallo Oy. 2011. [Viitattu 27.12.2011]. Saatavissa: <http://www.valtavallo.com/Tuotteet/LED-valoputket>
62. **Fluke Corporation.** Fluke 434/435 Kolmivaiheinen sähkön laadun analysaattori, Käyttöohje. Almelo, Hollanti: Fluke Corporation, 2006. 138 s.
63. **Power Standards Lab.** What is 61000-4-30? [Online]. Power Standards Lab. 2011. [Viitattu 27.12.2011]. Saatavissa: <http://powerstandards.com/IEC-61000-4-30.htm#1>
64. **Hyvönen, P.** THD:n kulkusuunta. Sähköpostiviesti. 23.8.2011. [Viitattu 29.1.2012]. Laboratorioinsinööri, suurjännitetekniikan tutkimusryhmän johtaja. Aalto yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos.

Liitteet

Liite 1. Fluke 435 kolmivaiheinen sähkön laadun analysaattori



Lähde: Transcat. 2011. Fluke 435/Basic [Online]. Transcat, Inc. [Viitattu 28.12.2011].
Saatavissa:

<http://www.transcat.com/catalog/productdetail.aspx?itemnum=435%2FBASIC>

Liite 2. Fluke 435 kolmivaiheisen sähkön laadun analysaattorin tekniset tiedot harmonisten yliaallojen mittausalueiden, erottelukyvyn ja tarkkuuden osalta

| Harmoniset yliaallot | Mittausalue | Erottelukyky | Tarkkuus |
|--|---|---|---|
| Harmonisten valinta (n) | DC, 1..50 Ryhmitys: Harmonisten ryhmät IEC 61000-4-7 mukaisesti | | |
| Epäharmonisten valinta | Off, 1..49 Ryhmitys: Harmonisten ja epäharmonisten alaryhmät IEC 61000-4-7 mukaisesti | | |
| Vrms suhteellinen (%f): | 0.0 ... 100.0% | 0.1% | $\pm 0.1\% \pm n \times 0.1\%$ ($\pm 0.4\%$ for %r) |
| Fluke 435 absoluuttinen: | 0.0 ... 1000 Vrms | 0.1 Vrms | $\pm 0.05\%$ nimellisjännitteestä, jos < 1% nimellisjännitteestä $\pm 5\%$ jos $\geq 1\%$ nimellisjännitteestä $\pm 5\% \pm 2$ lukemaa |
| Fluke 434 absoluuttinen: | 0.0 ... 1000 Vrms | 0.1 Vrms | $\pm 5\% \pm 2$ lukemaa |
| Arms suhteellinen (%f): | 0.0 ... 100.0% | 0.1% | $\pm 0.1\% \pm n \times 0.1\%$ ($\pm 0.4\%$ for %r) |
| Absoluuttinen: | 0.0 ... 4000 mV x pihdin skaalaus | 1 mVrms x pihdin skaalaus | $\pm 5\% \pm 5$ lukemaa |
| W suhteellinen: (vain harmoniset) | 0.0 ... 100.0% | 0.1% | $\pm n \times 2\%$ |
| W absoluuttinen: (vain harmoniset) | riippuu pihdin ja jännitteen skaalauksesta | | $\pm 5\% \pm n \times 2\% \pm 10$ lukemaa |
| DC suhteellinen: | 0.0 ... 100.0% | 0.1% | $\pm 0.1\% V$ ja A ($\pm 2\% W$) $\pm 0.2\%$ nimellisjännitteestä $\pm 5\% \pm 10$ lukemaa $\pm 5\% \pm 10$ lukemaa |
| Fluke 435 absoluuttinen V: | 0.0 ... 1000V | 0.1V | $\pm 5\% \pm 10$ lukemaa |
| Fluke 434 absoluuttinen V: | 0.0 ... 1000V | 0.1V | $\pm 5\% \pm 10$ lukemaa |
| Absoluuttinen A: | 0.0 ... 4000 mV x pihdin skaalaus riippuu pihdin ja jännitteen skaalauksesta | 1 mVrms x pihdin skaalaus 0.1V riippuu skaalauksesta | $\pm 5\% \pm 10$ lukemaa |
| Absoluuttinen W: | | | |
| THD _(n=40) (suhteellinen %f tai %r) | 0.0 ... 100.0 % | 0.1% | $\pm 2.5\% V$ ja A ($\pm 5\% W$) |
| Hz | 0 ... 3500 Hz | 1 Hz | $\pm 1\text{Hz}$ |
| Vaihekulma | | | |
| Fluke 435 | -360° ... +0° | 1° | $\pm n \times 1^\circ (^{\circ})$ |
| Fluke 434 | -360° ... +0° | 1° | $\pm n \times 1.5^\circ (^{\circ})$ |

Lähde: Fluke Corporation. 2006. Fluke 434/435 Kolmivaiheinen sähkön laadun analysaattori, Käyttöohje. Almelo, Hollanti. Fluke Corporation. 138 s.

Liite 3. Fluke i400s AC-virtapihdit



Lähde: Fluke Corporation. 2011. i400s AC Current Clump [Online]. Fluke Corporation. [Viitattu 28.12.2011]. Saatavissa: <http://www.fluke.com/fluke/usen/accessories/current-clamps/i400s.htm?PID=56300>

Liite 4. Fluke i400s AC-virtapihtien tekniset tiedot

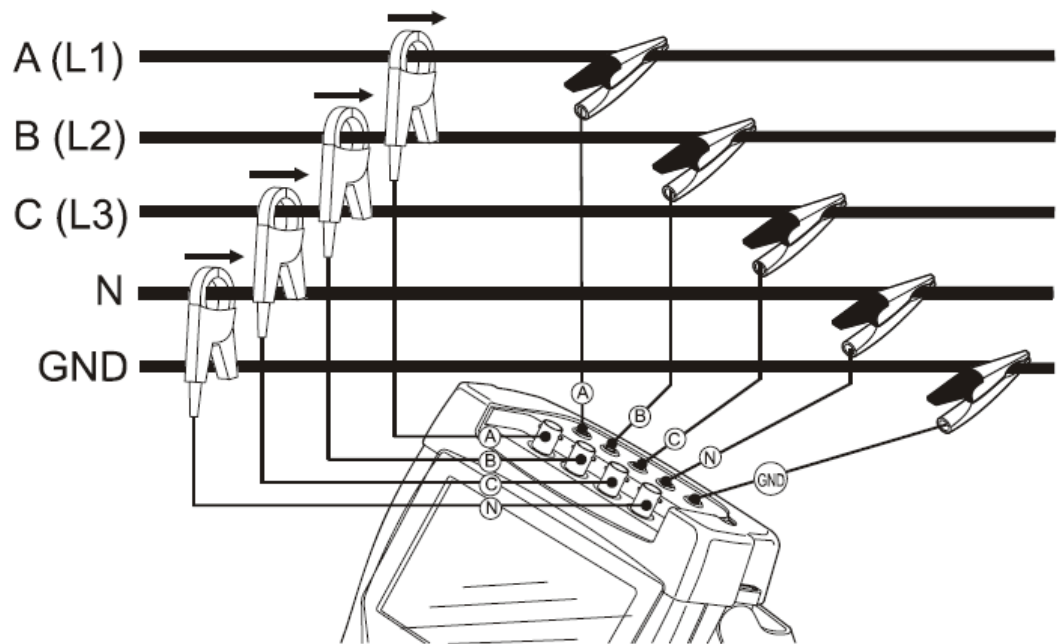
| Tekniset tiedot | |
|----------------------------|---|
| Mittausalue: | 40 A -alue 0,5 A - 40 A 400 A -alue 5 A - 400 A |
| Perustarkkuus: | 40 A -alue 2 % + 0,015 A (45 - 400 Hz) 400 A -alue 2 % + 0,04 A (45 - 400 Hz) |
| Vaiheensiirto: | 40 A -alue 0,5 - 1 A Ei määritetty 1 A - 5 A 4° 5 A - 10 A 3° 10 A - 20 A 3° 20 A - 40 A 2° 40 A - 400 A EO 400 A -alue 0,5 - 1 A EO 1 A - 5 A EO 5 A - 10 A Ei määritetty 10 A - 20 A 2° 20 A - 40 A 2° 40 A - 400 A 1,5° |
| Tyypillinen kaistanleveys: | 40 A -alue 5 Hz - 10 kHz 400 A -alue 5 Hz - 10 kHz |
| Ulostulosignaali(t): | 40 A -alue 10 mV/A 400 A -alue 1 mV/A |
| Huippu-kerroin: | 40 A -alue ≤3 400 A -alue ≤3 - 300 A ≤2,5 - 400 A |

| Turvallisuussuunnittelu | |
|-------------------------|-------------------------------|
| Turvaluokitus | CAT IV 600 V, CAT III, 1000 V |
| Suurin jännite | 1000 V AC |

| Mekaaniset ja yleiset tiedot | |
|------------------------------|------------------|
| Takuu | 1 vuosi |
| Johtimen suurin koko | 32 mm |
| Liitäntäkaapelin pituus | 2,5 m |
| BNC-adapteri | On |
| Mitat | 150 x 70 x 30 mm |
| Paino | 114 g |

Lähde: Fluke Corporation. 2011. i400s [Online]. Fluke Corporation. [Viitattu 28.12.2011]. Saatavissa:
<http://www.fluke.com/fluke/fifi/Lisavarusteet/Virtapihdit/i400s.htm?PID=56300>

Liite 5. Fluke 435 kolmivaiheisen sähkön laadun analysaattorin liittäminen kolmivaihejärjestelmään



Lähde: Fluke Corporation. 2006. Fluke 434/435 Kolmivaiheinen sähkön laadun analysaattori, Käyttöohje. Almelo, Hollanti. Fluke Corporation. 138 s.

Liite 6. Mittaustilanne



Pihkapuiston ala-asteen koulu, EC-moottorin sähkön laadun mittaukset